



TESIS - TE142599

**ANALISIS KESTABILAN *TRANSIENT* UNTUK
SISTEM SMART GRID BERDASARKAN METODE
LINTASAN KRITIS YANG MEMPERTIMBANGKAN
ALGORITMA PERSAMAAN SIMULTAN**

FIRILIA FILIANA
2215201207

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017



TESIS - TE142599

**ANALISIS KESTABILAN *TRANSIENT* UNTUK
SISTEM *SMART GRID* BERDASARKAN METODE
LINTASAN KRITIS YANG MEMPERTIMBANGKAN
PERSAMAAN SIMULTAN**

FIRILIA FILIANA
2215201207

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Firilia Filiana
NRP. 2215201207

Tanggal Ujian : 6 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. (Pembimbing I)
NIP: 19730927 199803 1 004
2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo., M.Eng. (Pembimbing II)
NIP: 19580916 198901 1 001
3. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T. (Penguji)
NIP: 19640405 199002 1 001
4. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. (Penguji)
NIP: 19551207 1980031 004
5. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D. (Penguji)
NIP: 19731119 200003 1 001



Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**ANALISIS KESTABILAN *TRANSIENT* UNTUK SISTEM *SMART GRID* BERDASARKAN METODE LINTASAN KRITIS YANG MEMPERTIMBANGKAN ALGORITMA PERSAMAAN SIMULTAN**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2017

Firilia Filiana

NRP. 2215201207

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALISIS KESTABILAN *TRANSIENT* UNTUK SISTEM *SMART GRID* BERDASARKAN METODE LINTASAN KRITIS YANG MEMPERTIMBANGKAN ALGORITMA PERSAMAAN SIMULTAN

Nama mahasiswa : Firilia Filiana
NRP : 2215201207
Pembimbing : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

ABSTRAK

Kestabilan *transient* terjadi karena ada gangguan besar pada sistem yang mempengaruhi generator. Gangguan akan menyebabkan masalah pada kestabilan sudut rotor generator. Hal ini sangat berbahaya bagi generator dan kestabilan sistem. Sistem yang dianalisis adalah sistem dengan beberapa generator. Saat terjadi gangguan, generator yang terkena pengaruh paling besar yang akan dianalisis atau disebut generator kritis. Karena analisis hanya dilakukan pada satu generator proses perhitungan akan lebih cepat.

Penelitian ini menggunakan metode lintasan kritis (*critical trajectory*) dimana analisis dilakukan menggunakan lintasan yang menggambarkan hubungan antara sudut rotor dan kecepatan putar generator. Lintasan ini juga menggambarkan keadaan saat sistem berada dalam kondisi stabil, tidak stabil dan kritis. Hasil akhir dari metode ini adalah *Critical Clearing Time* (CCT) atau waktu maksimal yang diizinkan saat terjadi gangguan sebelum sistem kehilangan kestabilan.

Pengujian dilakukan pada beberapa sistem untuk menguji keefektifan metode. Sistem yang digunakan adalah sistem *loop* dan radial yang menggunakan *single circuit*. Sistem juga diuji pada sistem konvensional dan *smart grid*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai CCT yang didapat dari metode *critical trajectory* akurat dan waktu perhitungannya cepat.

Kata kunci: *critical clearing time* (CCT), *Critical Trajectory*, generator kritis, *smart grid*

Halaman ini sengaja dikosongkan

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS ON SMART GRID SYSTEM BASED ON CRITICAL TRAJECTORY METHOD CONSIDERING SIMULTANEOUS EQUATION ALGORITHM

By : Firilia Filiana
Student Identity Number : 2215201207
Supervisor(s) : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng
2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery P., M.Eng

ABSTRACT

Transient stability occurs because there is a big disturbance on the system that affecting generator. Interference will cause problems to the stability of the generator rotor angle. This is very dangerous for the generator and stability of the system. The system analyzed is a system with several generators. When fault occurs, the most influenced generator is analyzed and this generator called a critical generator. Because the analysis is only done on one generator the calculation process can be faster.

This research used critical trajectory method where analysis is done using a trajectory that describes the relationship between rotor angle and angular velocity of generator. This trajectory also describes the situation when the system is stable, unstable and critical condition. The end process of this method is Critical Clearing Time (CCT) or the maximum time allowed during interruption before the system loses stability.

Testing is finished on several systems to prove the effectiveness of the method. The system was tested on loop and radial system that use a single circuit. This method has been tried on konventional system and smart grid as well. The simulation result shows that the CCT value obtained from critical trajectory method is accurate and the time of calculation is fast.

Key words: critical clearing time (CCT), critical generator, critical trajectory, smart grid

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Dalam menyelesaikan tesis ini penulis banyak mendapat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang masih memperkenankan kepada penulis kesempatan untuk menyelesaikan tesis ini.
2. Keluarga yang telah banyak memberikan dorongan dan doa terutama Ayah, Ibu dan kedua Adik penulis.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. dan Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo., M.Eng. dan Dosen Pengajar Teknik Elektro untuk segala arahan dan bimbingannya.
4. Niken, Dini, Trisna dan teman – teman S2 Teknik Elektro ITS Angkatan 2015/2016 Genap yang selalu memberikan semangat untuk menyelesaikan tesis ini.
5. Mba Leli, Yulia, Farida dan teman – teman yang selalu memberikan dukungan terus – menerus.
6. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian tesis ini.

Adapun saran dan kritik yang bersifat membangun sangat kami harapkan, demi tercapainya kemajuan yang lebih baik dimasa depan. Demikian semoga ini menjadi manfaat bagi semua.

Surabaya, 6 Juni 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Kontribusi	3
1.6 Metodologi Penelitian	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga	5
2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor	5
2.1.2 Kestabilan <i>Transient</i>	6
2.2 Metode Analisis Kestabilan <i>Transient</i>	8
2.2.1 <i>BCU Shadowing</i>	8
2.2.2 Metode Lintasan Kritis (<i>Critical Trajectory</i>)	9
2.3 <i>Critical Clearing Time</i> (CCT)	10
2.4 Sistem Tenaga Listrik	10
2.4.1 Sistem Tenaga Listrik Konvensional	10
2.4.2 Sistem Tenaga Listrik Cerdas (<i>Smart Grid</i>)	11
2.5 <i>Damper Winding (Damping)</i>	13
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Analisis Aliran Daya	15
3.2 Modifikasi Persamaan <i>Trapezoidal</i>	16
3.3 <i>End Point</i>	18

3.4	Metode <i>Newton-Raphson</i>	19
3.4.1	Matriks <i>Jacobian</i> dan Persamaan Simultan.....	19
3.5	Diagram Alir	21
3.6	Permodelan Generator dan Sistem Tenaga	22
3.6.1	Sistem Tenaga Terhubung <i>Infinite Bus</i>	23
3.6.2	Sistem Tenaga Tanpa <i>Infinite Bus</i>	25
3.7	Data Sistem Tenaga yang Dianalisis.....	26
3.7.1	Sistem IEEE 9 Bus	26
3.7.2	Sistem IEEE 16 Bus	28
3.7.3	Sistem IEEE 30 Bus	30
3.7.4	Sistem IEEE 57 Bus	34
BAB 4 HASIL PERHITUNGAN CCT		41
4.1	Hasil Perhitungan CCT Saat Sistem Terhubung <i>Infinite Bus</i>	41
4.1.1	Hasil Perhitungan Pada Sistem IEEE 9 Bus	41
4.1.2	Hasil Perhitungan Pada Sistem IEEE 30 Bus	45
4.1.3	Hasil Perhitungan Pada Sistem IEEE 57 Bus	48
4.1.4	Hasil Perhitungan Pada Sistem IEEE 16 Bus	51
4.2	Hasil Perhitungan CCT Saat Sistem tanpa <i>Infinite Bus</i>	55
4.2.1	Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 9 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	55
4.2.2	Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 30 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	58
4.2.3	Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 57 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	65
4.2.4	Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 16 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	70
72		
BAB 5 KESIMPULAN		75
DAFTAR PUSTAKA.....		77
DAFTAR INDEX.....		81
BIOGRAFI PENULIS		85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Listrik Sederhana	6
Gambar 2.2	Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan	7
Gambar 2.3	Metode Penentuan CUEP dengan Pendekatan Energi	9
Gambar 2.4	Lintasan <i>Single Machine</i> terhubung pada <i>Infinite Bus</i> dengan <i>Damping</i>	10
Gambar 2.5	<i>Damper Winding</i> pada Rotor Menonjol Dua Kutub	13
Gambar 3.1	Metode <i>Trapezoidal</i>	17
Gambar 3.2	Konfigurasi dan Dimensi Matriks Jacobian.....	20
Gambar 3.3	Diagram Alir Analisis Kestabilan <i>Transient</i>	22
Gambar 3.4	Model Generator Klasik.....	23
Gambar 3.5	Sistem IEEE 9 Bus	26
Gambar 3.6	Sistem IEEE 16 Bus	28
Gambar 3.7	Sistem IEEE 30 Bus	30
Gambar 3.8	Sistem IEEE 57 Bus	34
Gambar 4.1	Sistem IEEE 9 Bus yang Dimodifikasi	41
Gambar 4.2	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' dengan <i>damping</i>	44
Gambar 4.3	Kurva kecepatan putar rotor (ω) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' dengan <i>damping</i>	44
Gambar 4.4	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' dengan <i>damping</i>	44
Gambar 4.5	Sistem IEEE 30 Bus Terhubung <i>Infinite Bus</i>	45
Gambar 4.6	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' dengan <i>damping</i>	47

Gambar 4.7	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabi l sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' dengan <i>damping</i>	47
Gambar 4.8	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' dengan <i>damping</i>	47
Gambar 4.9.	Sistem IEEE 57 Bus Terhubung <i>Infinite Bus</i>	48
Gambar 4.10	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa <i>damping</i>	50
Gambar 4.11	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa <i>damping</i>	51
Gambar 4.12	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa <i>damping</i>	51
Gambar 4.13	Sistem IEEE 16 Bus	52
Gambar 4.14	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabi l sampai tidak stabil pada titik gangguan 'G' dengan <i>damping</i>	54
Gambar 4.15	Kurva kecepatan putar rotor (ω) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'G' dengan <i>damping</i>	54
Gambar 4.16	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'G' dengan <i>damping</i>	54
Gambar 4.17	Sistem IEEE 9 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	55
Gambar 4.18	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa <i>damping</i>	57
Gambar 4.19	Kurva kecepatan putar rotor (ω) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa <i>damping</i>	58
Gambar 4.20	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa <i>damping</i>	58

Gambar 4.21	Sistem IEEE 30 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	59
Gambar 4.22	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa <i>damping</i>	61
Gambar 4.23	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabi l sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa <i>damping</i>	61
Gambar 4.24	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa <i>damping</i>	62
Gambar 4.25	Sistem IEEE 30 Bus Modifikasi	62
Gambar 4.26	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa <i>damping</i>	64
Gambar 4.27	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa <i>damping</i>	65
Gambar 4.28	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa <i>damping</i>	65
Gambar 4.29	Sistem IEEE 57 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	66
Gambar 4.30	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa <i>damping</i>	69
Gambar 4.31	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa <i>damping</i>	69
Gambar 4.32	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa <i>damping</i>	69
Gambar 4.33	Sistem IEEE 16 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	70
Gambar 4.34	Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabi l sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa <i>damping</i>	72

Gambar 4.35	Kurva kecepatan putar rotor (ω) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa <i>damping</i>	72
Gambar 4.36	Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa <i>damping</i>	73

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Generator pada Sistem IEEE 9 Bus	27
Tabel 3.2	Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 9 Bus....	27
Tabel 3.3	Data Saluran Sistem IEEE 9 Bus	27
Tabel 3.4	Data Generator pada Sistem IEEE 16 Bus	28
. Tabel 3.5	Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 16 Bus..	29
Tabel 3.6	Data Saluran Sistem IEEE 16 Bus	29
Tabel 3.7	Data Generator pada Sistem IEEE 30 Bus	31
Tabel 3.8.	Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 30 Bus..	31
Tabel 3.9	Data Saluran Sistem IEEE 30 Bus	32
Tabel 3.10	Data Generator pada Sistem IEEE 57 Bus	35
Tabel 3.11	Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 57 Bus..	35
Tabel 3.12	Data Saluran Sistem IEEE 57 Bus	357
Tabel 4.1	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 9 Bus dengan <i>Infinite Bus</i>	42
Tabel 4.2	Nilai CCT pada Sistem IEEE 9 Bus Tanpa <i>Damping</i> Terhubung <i>Infinite Bus</i>	42
Tabel 4.3	Nilai CCT pada Sistem IEEE 9 Bus dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i> dan Terhubung dengan <i>Infinite Bus</i>	42
Tabel 4.4.	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 9 Bus yang Dimodifikasi.....	43
Tabel 4.5	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 30 Bus dengan <i>Infinite Bus</i>	45
Tabel 4.6	Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus Tanpa <i>Damping</i> Terhubung <i>Infinite Bus</i>	46
Tabel 4.7	Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i> dan Terhubung dengan <i>Infinite Bus</i>	46
Tabel 4.8	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 30 Bus	46
Tabel 4.9	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 57 Bus Terhubung dengan <i>Infinite Bus</i>	49
Tabel 4.10	Nilai CCT pada Sistem IEEE 57 Bus Tanpa <i>Damping</i> Terhubung <i>Infinite Bus</i>	49

Tabel 4.11	Nilai CCT pada Sistem IEEE 57 Bus dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i> dan Terhubung dengan <i>Infinite Bus</i>	50
Tabel 4.12	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 57 Bus.....	50
Tabel 4.13	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 16 Bus dengan <i>Infinite Bus</i>	53
Tabel 4.14	Nilai CCT pada Sistem IEEE 16 Bus Tanpa <i>Damping</i> Terhubung <i>Infinite Bus</i>	53
Tabel 4.15	Nilai CCT pada Sistem IEEE 16 Bus dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i> dan Terhubung dengan <i>Infinite Bus</i>	53
Tabel 4.16	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 16 Bus.....	53
Tabel 4.17	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 9 Bus.....	56
Tabel 4.18	Nilai CCT pada Sistem IEEE 9 Bus Tanpa <i>Damping</i>	56
Tabel 4.19	Nilai CCT pada Sistem IEEE 9 Bus dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i>	57
Tabel 4.20	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 9 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	57
Tabel 4.21	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 30 Bus.....	59
Tabel 4.22	Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus Tanpa <i>Damping</i>	60
Tabel 4.23	Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i>	60
Tabel 4.24	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 30 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	61
Tabel 4.25	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 30 Bus yang Dimodifikasi.....	63
Tabel 4.26	Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus yang Dimodifikasi Tanpa <i>Damping</i>	63
Tabel 4.27	Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus yang Dimodifikasi dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i>	64
Tabel 4.28	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 30 Bus Modifikasi tanpa <i>Infinite Bus</i>	64
Tabel 4.29	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 57 Bus.....	67
Tabel 4.30	Nilai CCT pada Sistem IEEE 57 Bus Tanpa <i>Damping</i>	67
Tabel 4.31	Nilai CCT pada Sistem IEEE 57 Bus dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i>	68

Tabel 4.32	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 57 Bus tanpa <i>Infinite Bus</i>	68
Tabel 4.33	Nilai CUEP pada Sistem IEEE 16 Bus	71
Tabel 4.34	Nilai CCT pada Sistem IEEE 16 Bus Tanpa <i>Damping</i>	71
Tabel 4.35	Nilai CCT pada Sistem IEEE 16 Bus dengan Mempertimbangkan <i>Damping</i>	71
Tabel 4.36	Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 30 Bus Modifikasi tanpa <i>Infinite Bus</i>	72

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengoperasian sistem tenaga listrik saat ini dituntut untuk berada dalam keadaan optimal. Perancangan dan pengoperasian sistem tenaga yang baik ditentukan beberapa hal. Pertama sistem harus dapat mengatasi perubahan permintaan daya pada beban baik daya aktif maupun reaktif. Kemudian sistem berjalan dengan biaya yang minimum dan menimbulkan efek yang juga minimum pada lingkungan. Terakhir adalah kualitas dari sumber, misalnya frekuensi dan tegangan yang konstan dan keandalan yang tinggi [1].

Kondisi ini tidak selalu terpenuhi karena sistem tenaga listrik akan sering mengalami gangguan baik besar maupun kecil. Saat mengalami gangguan sistem akan mengalami masalah kestabilan. Kestabilan sistem tenaga listrik sendiri di definisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga dengan kondisi awal tertentu kemudian mengalami gangguan, dengan banyak variabel yang dibatasi untuk kembali ke keadaan normal [2]. Kestabilan sistem yang dapat menyebabkan masalah besar adalah kestabilan *transient*.

Analisis kestabilan *transient* dapat dilakukan dengan integrasi numerik untuk mendapatkan respon dinamis dari gangguan. Cara ini cukup efektif untuk sistem yang kompleks dan untuk berbagai fenomena tidak linier yang kompleks. Kelemahan integrasi numerik adalah waktu yang lama dalam prosesnya. Metode lain diperkenalkan untuk mempercepat proses perhitungan, yaitu metode fungsi energi. Metode ini menilai kestabilan sistem berdasarkan energi saat waktu *transient*. Metode ini menghitung energi kritis dan mengevaluasinya. Hal ini akan mempengaruhi akurasi analisis kestabilan *transient*. Walaupun proses perhitungannya lebih cepat, metode ini tidak dapat menangani masalah *transient* di sistem tenaga yang kompleks [3-8].

Sebuah metode baru yaitu metode *Critical Trajectory*, digunakan untuk menganalisis kestabilan *transient* berdasarkan lintasan kritis yang terbentuk mulai dari terjadi gangguan sampai saat sebelum sistem kehilangan sinkronisasinya atau

titik kritis. Titik kritis ini disebut *Unstable Equilibrium Point* (UEP). Persamaan *Trapezoidal* dilakukan untuk perhitungan integrasi numerik dan persamaan simultan digunakan untuk mempercepat proses perhitungan [8-11].

Metode Lintasan Kritis telah digunakan di beberapa sistem tenaga dengan konfigurasi *loop* dengan tingkat keefektifan yang cukup baik. Konfigurasi *loop* digunakan di sistem transmisi di Indonesia dan konfigurasi radial berada di sistem distribusi. Sementara sistem industri dapat menggunakan keduanya baik sistem *loop* ataupun radial. Perkembangan sistem tenaga yang terus melesat memunculkan ide mengenai sistem tenaga pintar (*Smart Grid*) yang baik, handal dan keunggulan – keunggulan yang belum dimiliki sistem tenaga konvensional. *Smart Grid* dibentuk untuk dapat menghadapi berbagai masalah sistem tenaga listrik. Penelitian ini akan menganalisis masalah kestabilan *transient* yang terjadi di *Smart Grid* menggunakan metode lintasan kritis.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan utama yang menjadi bahasan pada penelitian ini adalah mendapatkan nilai CCT menggunakan metode *Critical Trajectory* dengan mempertimbangkan *critical generator* dan sistem satu saluran di *Smart Grid*.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah menerapkan metode *Critical Trajectory* untuk mendapatkan nilai CCT secara langsung pada sistem multimesin di *Smart Grid*.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan simulasi pada *software MATLAB*. Sistem yang digunakan ialah *Smart Grid* multimesin dengan satu saluran. Metode yang digunakan untuk menentukan nilai CCT adalah metode *Critical Trajectory* dengan mempertimbangkan *critical generator*.

1.5 Kontribusi

Penelitian ini menggunakan metode baru yaitu *Critical Trajectory* untuk menentukan nilai CCT secara langsung dan cepat pada analisis kestabilan *transient*. Metode dapat digunakan pada *Smart Grid* secara efektif.

1.6 Metodologi Penelitian

Penelitian dimulai dengan mencari bahan dan materi seputar kestabilan *transient*. Selanjutnya perancangan model sistem dan pembuatan algoritma untuk metode *Critical Trajectory*. Langkah selanjutnya mencari data yang akan digunakan untuk perhitungan nilai CCT. Metode diawali dengan inisialisasi awal dan selanjutnya dilakukan iterasi sampai nilai yang didapatkan akurat. Hasil perhitungan CCT akan dianalisis dan kemudian membuat kesimpulan dari hasil analisis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga

Kestabilan sistem tenaga secara umum didefinisikan sebagai bagian dari sistem tenaga yang mampu mempertahankan operasi sistem dalam batas keadaan normal dan mendapatkan kembali keadaan dalam batas normal setelah mengalami gangguan [2].

Kestabilan adalah kondisi seimbang antara dua hal yang bertentangan. Dalam kasus ini adalah mekanisme mesin sinkron dalam mempertahankan sinkronisasinya setelah mengalami gangguan, yang dapat mempercepat atau memperlambat putaran rotor. Di beberapa situasi, kestabilan sistem tergantung pada ketersediaan torsi yang cukup untuk memulihkan keadaan [12-14]

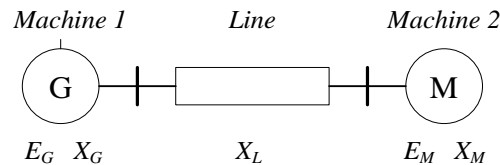
2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor

Dalam keadaan normal, posisi rotor terhadap medan magnet di stator akan tetap. Sudut yang terbentuk ini disebut sudut daya. Selama gangguan, kecepatan rotor akan meningkat atau menurun. Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan mesin sinkron dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya. Faktor dasar dari masalah ini adalah perilaku pada daya keluaran mesin sinkron yang berubah – ubah seperti osilasi rotornya [12-14].

Pada mesin sinkron, medan stator dan rotor bereaksi satu sama lain dan torsi elektromagnetik dihasilkan dari kecenderungan medan tersebut untuk saling meluruskan (sinkron). Pada generator, torsi elektromagnetik berputar berlawanan dengan rotor. Sehingga *prime mover* memiliki torsi mekanik untuk mempertahankan putaran. Torsi elektrik (daya) keluaran generator berubah hanya jika torsi mekanik masukan *prime mover* berubah. Efek dari peningkatan torsi mekanik adalah perubahan rotor ke posisi yang baru sesuai dengan putaran medan magnet stator. Sebaliknya, mengurangi torsi mekanik akan memperlambat posisi rotor. Dalam keadaan *steady state*, medan rotor dan putaran medan stator

memiliki kecepatan yang sama. Walaupun begitu akan ada perbedaan sudut antara mereka tergantung pada torsi elektrik (daya) keluaran generator.

Hubungan antara daya dan sudut rotor sangat tidak linier. Sebuah sistem sederhana diperlihatkan oleh Gambar 2.1. Sistem pada Gambar 2.1 memiliki dua mesin sinkron yang dihubungkan oleh jaringan transmisi yang memiliki reaktansi induktif (X_L). Diasumsikan mesin 1 mewakili generator yang memberi daya ke motor sinkron yang diwakili oleh mesin 2. Daya yang disalurkan dari generator ke motor adalah fungsi beda sudut (δ) antara rotor dari mesin – mesin. Model sederhana ini berisi tegangan internal (E) dan reaktansi (X) digunakan untuk mewakili setiap mesin sinkron [1].



Gambar 2.1 Sistem Listrik Sederhana [1]

Daya (P) yang dikirim dari generator ke motor ialah:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad (2.2)$$

Daya yang disalurkan tergantung pada reaktansi (X_T) dan beda sudut antara dua tegangan. Kurva yang dihasilkan dari persamaan (2.1) disebut Kurva Sudut Daya [12-14].

2.1.2 Kestabilan *Transient*

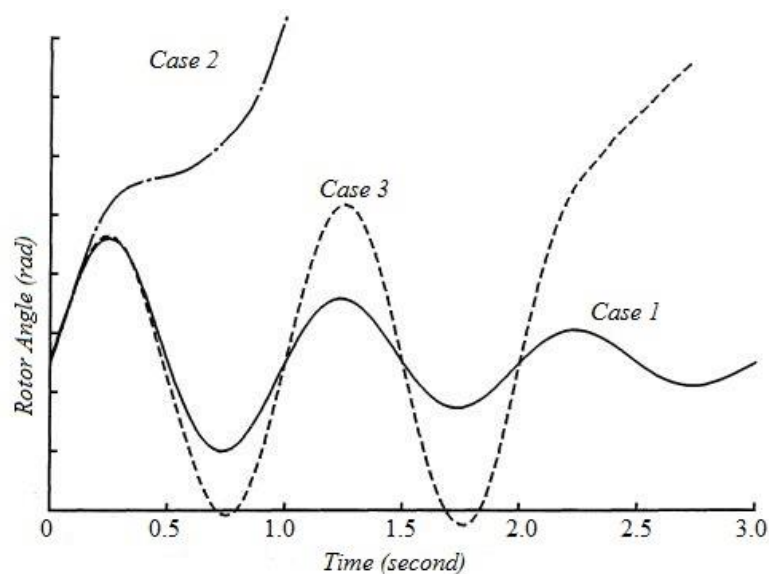
Kestabilan *transient* berpusat pada perilaku sistem saat mengalami gangguan *transient*. Gangguan dapat berupa gangguan kecil seperti perubahan beban yang berkelanjutan, gangguan lain seperti hubung singkat di saluran transmisi, kehilangan beban atau sumber yang sangat besar. Respon dari sistem akan melibatkan banyak peralatan. Peralatan yang digunakan untuk proteksi dapat

merespon kejadian gangguan di sistem dan berefek pada kinerja sistem. Pada beberapa kejadian, respon dari beberapa peralatan dapat signifikan. Sehingga beberapa asumsi dibuat untuk menyederhanakan masalah dan fokus pada faktor yang mempengaruhi tipe spesifik dari kestabilan *transient* [1],[12-14].

Menurut [1] kestabilan *transient* sendiri adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya ketika terjadi gangguan besar. Hal ini akan mempengaruhi sudut rotor generator dan hubungan sudut rotor dan daya. Kestabilan tergantung pada keadaan awal sistem dan tingkat keparahan gangguan. Sistem dapat diubah sehingga setelah gangguan operasi *steady state* berbeda dari sebelum gangguan. Gangguan yang terjadi adalah hubung singkat. Gangguan diasumsikan di saluran dekat bus. Gangguan diasumsikan hilang dengan membuka *circuit breaker* yang sesuai untuk mengisolasi bagian yang terganggu.

Pada analisis kestabilan *transient*, waktu yang diperhatikan biasanya dibatasi 3 – 5 detik setelah gangguan, walaupun dapat lebih dari 10 detik untuk sistem yang sangat besar.

Gambar 2.2 mengilustrasikan sifat dari mesin sinkron untuk keadaan stabil dan tidak stabil. Gambar 2.2 menunjukkan respon sudut rotor untuk satu keadaan stabil (*Case 1*) dan dua keadaan tidak stabil (*Case 2* dan *Case 3*). Di *Case 1*, sudut rotor meningkat di maksimum, kemudian menurun dan berosilasi dengan penurunan *amplitude* sampai mencapai *steady state*. Pada *Case 2*, sudut rotor terus



Gambar 2.2 Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan [1]

naik sampai hilang sinkron. Bentuk ketidakstabilan ini disebut ketidakstabilan ayunan pertama disebabkan oleh tidak cukupnya torsi sinkronisasi. Pada *Case 3*, sistem stabil di ayunan pertama tetapi menjadi tidak stabil karena hasil dari osilasi yang terus meningkat di akhir pendekatan.

Di sistem yang besar, kestabilan *transient* tidak selalu terjadi sebagai ketidaksetabilan ayunan pertama, juga dapat akibat dari beberapa jenis osilasi yang menyebabkan penyimpangan besar dari sudut rotor diluar ayunan pertama.

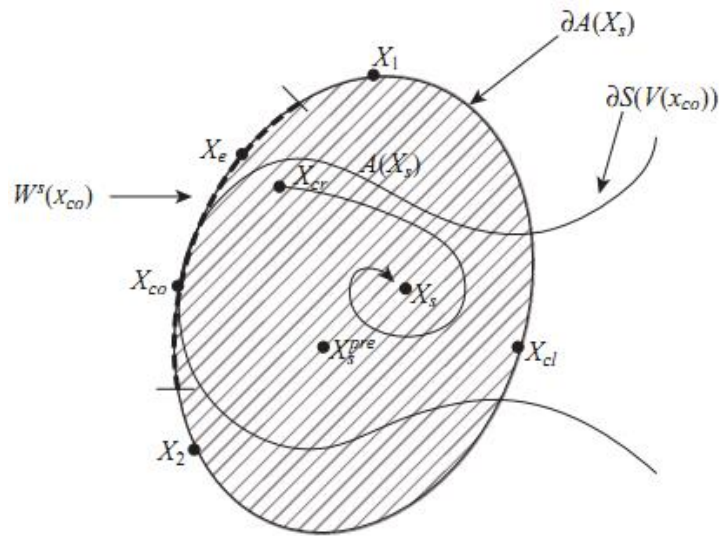
2.2 Metode Analisis Kestabilan *Transient*

Metode awal yang digunakan untuk analisis kestabilan *transient* adalah metode tidak langsung yaitu *Time Domain Simulation* (TDS). Metode ini disebut tidak langsung karena metode ini tidak menentukan nilai CCT secara langsung tetapi perkiraan. Metode ini dapat digunakan untuk sistem dengan kompleksitas yang tinggi. Perkiraan nilai CCT yang dihasilkan cukup akurat tetapi waktu yang perlukan untuk menyelesaikan proses analisis cukup lama. Selanjutnya berkembang metode *Energy Function* dimana analisis dilakukan berdasarkan energi yang ada saat gangguan. Metode ini memakan waktu yang lebih cepat dibanding metode TDS tetapi tingkat keakuratannya kurang. Metode ini disebut metode langsung karena nilai CCT dapat langsung diketahui pada akhir proses, tetapi tidak dapat digunakan untuk sistem dengan kompleksitas yang tinggi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode lintasan kritis. Analisis dilakukan menggunakan lintasan yang terjadi selama gangguan [3-8].

2.2.1 *BCU Shadowing*

Penelitian ini menggunakan metode *BCU Shadowing* untuk menentukan *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP). CUEP sendiri adalah titik kestabilan yang paling mendekati lintasan saat terjadi gangguan (*fault on trajectory*) yang menyebabkan sistem dalam keadaan kritis atau berada dalam keadaan antara stabil dan tidak stabil.

Ada suatu daerah kestabilan ($A(X_S)$) dengan batas kestabilan ($\partial A(X_S)$). Semua titik dalam batas kestabilan ini (X_1, X_2, X_{cl}), menjadi titik UEP. Titik – titik



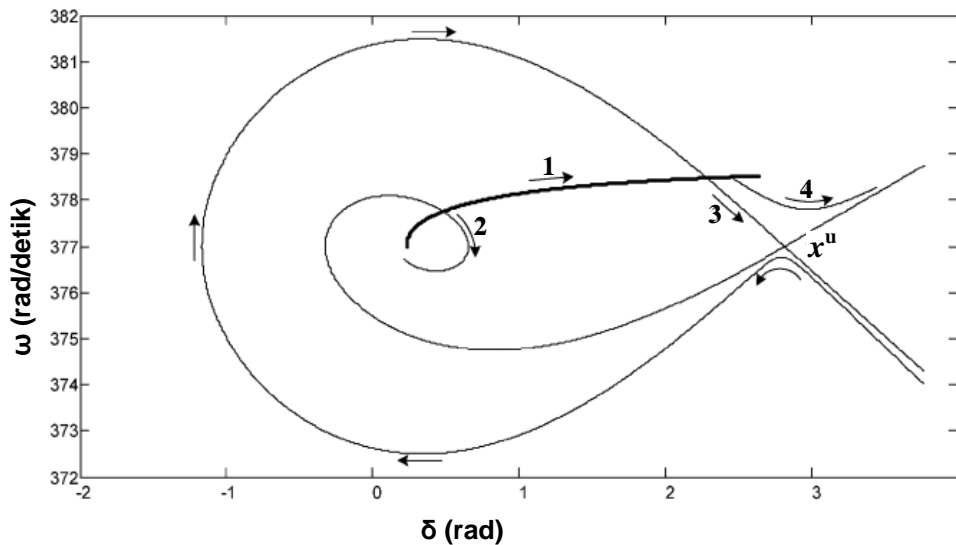
Gambar 2.3 Metode Penentuan CUEP dengan Pendekatan Energi [5]

yang berada dalam daerah kestabilan misal X_s^{pre} menggambarkan keadaan stabil. Lintasan energi kritis ($W^s(X_{co})$) akan terbentuk di batas kestabilan antara titik X_1 dan X_2 . Jika terjadi gangguan akan ada lintasan baru yang terbentuk dari titik kritis (X_{cr}) sampai titik kestabilan yang baru (X_s). Sistem akan stabil karena lintasan yang terbentuk terdapat dalam daerah kestabilan dan tidak melewati batas kestabilan (*exit point*) di titik X_e . Jika gangguan yang terjadi besar akan terbentuk lintasan energi ($\partial S(V(x_{co}))$). Lintasan ini akan berpotongan dengan lintasan energi kritis di titik CUEP (X_{co}). Titik perpotongan ini yang disebut dengan CUEP[5]. Metode ini digambarkan pada Gambar 2.3.

Metode *Energy Function* akan digunakan untuk menentukan *critical generator* (CG). Energi potensial dalam di setiap generator akan dihitung. Generator dengan energi potensial terbesar akan menjadi *critical generator*.

2.2.2 Metode Lintasan Kritis (*Critical Trajectory*)

Metode *Critical Trajectory* menggunakan beberapa lintasan selama proses analisis. Lintasan suatu sistem tenaga terlihat pada Gambar 2.3. Lintasan 1 adalah lintasan saat terjadi gangguan. Lintasan 2 adalah lintasan saat keadaan stabil yaitu gangguan hilang sebelum hilang sinkron dan lintasan ini beresilasi disekitar *Stable Equilibrium Point* (SEP). Sementara keadaan tidak stabil digambarkan oleh lintasan



Gambar 2.4 Lintasan *Single Machine* terhubung pada *Infinite Bus* dengan *Damping* [3]

4 yaitu saat gangguan terlambat diatasi. Lintasan 3 menggambarkan keadaan kritis dan lintasan ini yang disebut lintasan kritis, yang akan mencapai *Unstable Equilibrium Point* (UEP). Lintasan kritis diartikan sebagai lintasan mulai dari terjadi gangguan sampai sesaat sebelum kehilangan sinkronisasi. Metode ini termasuk metode langsung yang nilai dari CCT akan langsung diketahui pada akhir proses [8-11].

2.3 *Critical Clearing Time* (CCT)

Waktu pemutusan kritis atau dikenal dengan istilah *Critical Clearing Time* (CCT) adalah waktu maksimum yang diperbolehkan selama gangguan terjadi [2]. Jika gangguan dapat diatasi sebelum CCT maka sistem akan kembali pada keadaan stabil. Sebaliknya jika waktu CCT ini terlewat maka sistem akan kehilangan kestabilannya. Waktu CCT pada sistem berbeda – beda sesuai dengan karakteristik pada masing – masing sistem.

2.4 Sistem Tenaga Listrik

2.4.1 Sistem Tenaga Listrik Konvensional

Secara tradisional, istilah *grid* digunakan untuk sistem kelistrikan yang dapat mendukung semua atau beberapa dari empat komponen sebagai berikut:

pembangkit listrik, transmisi listrik, distribusi listrik, dan kontrol listrik [1], [12], [17].

Sistem tenaga listrik memiliki bentuk dan ukuran yang bermacam – macam sesuai dengan komponen pendukungnya. Namun, mereka semua memiliki karakteristik dasar yang sama seperti yang telah dijelaskan pada [12]. Sistem tenaga terdiri dari sistem ac tiga fasa yang pada dasarnya beroperasi pada tegangan konstan. Peralatan pembangkit dan transmisi menggunakan tiga fase begitu juga peralatan industri. Beban dari hunian penduduk dan komersial pada satu fase didistribusikan secara merata di antara fasa sehingga membentuk sistem fase tiga secara seimbang. Sistem tenaga menggunakan mesin sinkron untuk pembangkit listrik. *Prime movers* atau penggerak generator mengubah sumber energi utama misalnya hidrolik menjadi energi mekanik yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik oleh generator sinkron. Daya dari pembangkit pada sistem tenaga dikirimkan dari jarak jauh ke konsumen yang berada di area yang luas. Ini memerlukan sistem transmisi yang terdiri dari subsistem yang beroperasi pada tingkat tegangan yang berbeda.

Pembangkit kecil dapat diletakkan dekat beban di daerah subtransmisi atau distribusi sistem secara langsung. Interkoneksi antara sistem biasanya dilakukan pada level transmisi. Sistem secara keseluruhan mengandung beberapa sumber pembangkit dan beberapa tingkat transmisi. Ini membuat sistem dapat tetap bekerja walaupun ada komponen dalam sistem yang rusak saat gangguan tanpa memengaruhi pelayanan.

2.4.2 Sistem Tenaga Listrik Cerdas (*Smart Grid*)

Jaringan listrik tradisional umumnya digunakan untuk membawa daya dari beberapa generator pusat ke sejumlah besar pengguna atau pelanggan. Namun sekarang telah berkembang sumber energi terbarukan di jaringan. Adanya pembangkit – pembangkit kecil pada jaringan memerlukan teknologi serta pengendalian sistem yang berbeda. *Smart Grid* menggunakan arus listrik dua arah dan informasi untuk penyaluran energi yang baik dan terdistribusi secara otomatis. Teknologi *Smart Grid* adalah kumpulan teknologi yang ada dan berkembang yang

kemudian digabungkan bersama. Teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi dalam produksi dan konsumsi listrik dan meningkatkan kehandalan dan integrasi daya terbarukan ke dalam jaringan [15-20].

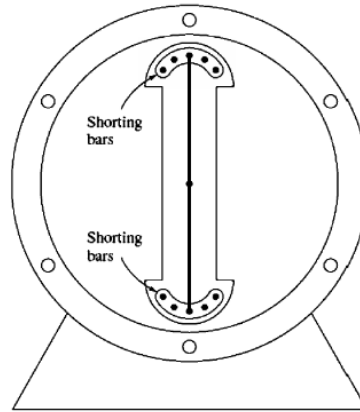
Dengan memanfaatkan teknologi informasi modern, *Smart Grid* mampu memberikan daya dengan cara yang lebih efisien dan merespons berbagai kondisi dan kejadian. Secara umum, *Smart Grid* dapat merespons kejadian dan menerapkan tindakan yang sesuai untuk setiap kejadian yang terjadi di manapun di *grid*, seperti pembangkit listrik, transmisi, distribusi, dan pelanggan. Misalnya, ketika terjadi peristiwa kegagalan di jaringan distribusi, *Smart Grid* dapat secara otomatis mengubah aliran daya dan memulihkan pelayanan.

Smart Grid dianggap sebagai sistem listrik yang menggunakan teknologi cerdas secara terpadu pada setiap komponen jaringan misalnya pembangkit listrik, transmisi, gardu induk, distribusi dan konsumsi untuk mencapai sistem yang bersih, aman, handal, tangguh, efisien, dan berkelanjutan. Dengan luasnya penelitian *Smart Grid*, penelitian yang berbeda dapat mengungkapkan pandangan yang berbeda untuk *Smart Grid* karena fokus dan sudut pandang yang berbeda. Menurut [17] secara umum *Smart Grid* memiliki tiga sistem utama yaitu 1) sistem infrastruktur energi, informasi, dan komunikasi yang mendukung berbagai komponen dalam smart grid. 2) Sistem manajemen cerdas yang menyediakan layanan manajemen dan kontrol lanjutan. 3) Sistem proteksi cerdas yang menyediakan analisis keandalan jaringan, perlindungan kegagalan sistem, dan layanan keamanan dan privasi.

Sistem perlindungan yang cerdas di *Smart Grid* harus mengatasi tidak hanya masalah infrastruktur jaringan yang tidak disengaja karena misalnya kesalahan pengguna, kegagalan peralatan, dan bencana alam, namun juga gangguan yang disengaja, seperti pencurian komponen jaringan. Untuk *Smart Grid*, satu pendekatan yang efektif untuk mencegah kegagalan terjadi adalah dengan memprediksi titik lemah atau daerah rawan gangguan dalam sistem.

2.5 *Damper Winding (Damping)*

Damper winding (belitan peredam) adalah bar khusus yang diletakkan pada permukaan rotor mesin sinkron dan pada setiap ujungnya dihubungkan menjadi satu dengan penghubung berbentuk cincin. Pada rotor kutub menonjol ter-



Gambar 2.5 *Damper Winding* pada Rotor Menonjol Dua Kutub

letak pada permukaan sepatu kutub dan pada rotor kutub dalam terletak pada *slot* tempat kumparan rotor. Gambar 2.5 menunjukkan penggambaran *damper winding* pada mesin sinkron.

Medan magnet stator berputar pada kecepatan konstan, dan akan berubah jika frekuensi sistem berubah. Jika putaran rotor sinkron, maka pada damper winding tidak memiliki tegangan induksi sama sekali. Jika rotor berubah menjadi lebih lambat dari kecepatan sinkron, maka akan ada pergerakan relatif antara medan magnet rotor dan medan magnet stator dan akan ada tegangan induksi pada belitan. Tegangan ini menghasilkan aliran arus, yang kemudian menghasilkan medan magnet. Interaksi kedua medan magnet tersebut menghasilkan torsi yang cenderung mempercepat putaran rotor. Namun jika rotor berputar lebih cepat dari medan magnet stator, torsi yang dihasilkan akan memperlambat putaran rotor. Torsi yang dihasilkan oleh damper winding dapat membantu mempercepat kestabilan mesin saat ada gangguan [21].

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya digunakan untuk menentukan keadaan awal sistem. Hasil analisis aliran daya akan digunakan untuk proses analisis selanjutnya. Aliran daya diawali dengan membentuk matriks Y_{bus} sebagai berikut:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} ; \quad j \neq i \quad (3.2)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (3.3)$$

Matriks Y_{bus} akan dimasukkan kedalam persamaan umum aliran daya. Melalui proses aliran daya akan diketahui keadaan *steady state* dari sistem mulai dari tegangan dan sudut tegangan, daya aktif dan reaktif yang dibangkitkan generator dan di serap beban, serta rugi – rugi jaringan. Dalam kasus kestabilan *transient* studi aliran daya digunakan untuk inisialisasi keadaan awal. Persamaan umum aliran daya dituliskan pada persamaan (3.4).

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \quad (3.4)$$

Metode yang digunakan untuk proses aliran daya ialah metode *Newton Raphson*. Metode *Newton Raphson* telah lama digunakan untuk menyelesaikan perhitungan aliran daya. Metode ini akurat dan dapat digunakan pada banyak sistem sehingga perhitungan aliran daya sampai saat ini masih menggunakan metode *Newton Raphson*. Prinsip dari metode *Newton Raphson* untuk aliran daya adalah menggunakan *power mismatch* dimana daya masuk pada bus sama dengan daya keluar bus seperti pada (3.4).

Pada [22] telah di jelaskan pendekatan baru untuk analisis aliran daya menggunakan metode *Newton Raphson*. Metode ini dapat digunakan pada sistem *loop* dan radial. Metode ini menggunakan *current balance* di mana arus masuk bus sama dengan arus keluar bus. Metode ini digambarkan sebagai persamaan (3.5).

$$(I_{gen,k} - I_{dem,k}) - \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i = 0 \quad (3.5)$$

Penggunaan seimbang arus ini akan menyebabkan perubahan pada element matriks *jacobian* seperti yang telah dijelaskan pada [23]. Perubahan ini menyebabkan perhitungan yang dibutuhkan menjadi lebih cepat dari pada metode *Newton Raphson* biasa.

3.2 Modifikasi Persamaan *Trapezoidal*

Suatu sistem tenaga dianggap beroperasi dalam keadaan normal pada keadaan stabil di titik x_{pre} dan gangguan terjadi di $t = 0$ hingga $t = \tau$ sehingga sistem mengalami respon sebagai berikut:

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre}; \quad x \in R^N, t \in R, f_F : R^N \rightarrow R^N \quad (3.6)$$

Dari persamaan 3.6 akan dibentuk kurva saat gangguan (*fault-on trajectory*) yang dapat dituliskan seperti persamaan 3.7.

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau; \quad X_F(t; x_{pre}) : R \rightarrow R^N \quad (3.7)$$

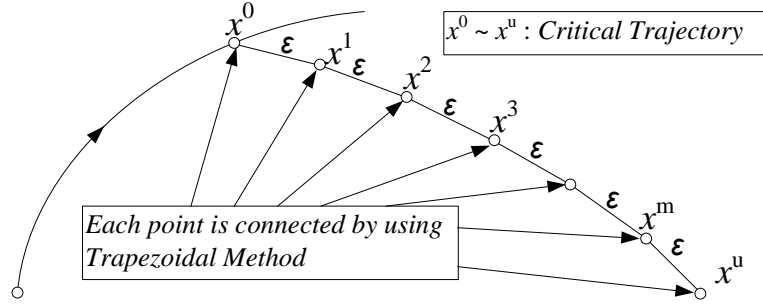
Keadaan setelah gangguan digambarkan dalam persamaan 3.8

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; \quad f : R^N \rightarrow R^N. \quad (3.8)$$

Persamaan 3.8 akan membentuk kurva setelah gangguan yang di tuliskan seperti persamaan 3.9

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; \quad X(\cdot; x^0) : R^N \rightarrow R^N. \quad (3.9)$$

Perhitungan numerik diselesaikan dengan menggunakan persamaan *Trapeziodal*. Persamaan umum *Trapezoidal* dapat dituliskan seperti persamaan 3.10. x^k akan menggantikan fungsi waktu t^k . k adalah perpindahan terhadap waktu.



Gambar 3.1 Metode Trapezoidal

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.10)$$

$$\dot{x}^k = f(x^k). \quad (3.11)$$

Lintasan (*trajectory*) selama gangguan sampai keadaan kritis digambarkan mulai dari x^0 sampai x^u pada Gambar 3.1. Jarak antara dua titik di tuliskan sebagai persamaan 3.12

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2}|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|(t^{k+1} - t^k). \quad (3.12)$$

Fungsi waktu akan digantikan fungsi jarak seperti pada persamaan 3.13

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon. \quad (3.13)$$

Persamaan 3.13 di substitusi ke persamaan 3.10 sehingga di dapat persamaan 3.14

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0. \quad (3.14)$$

Modifikasi ini dilakukan untuk menghindari waktu yang tak terbatas saat pencarian nilai CCT dilakukan. Secara umum, permasalahan dapat dituliskan melalui persamaan 3.15 sebagai berikut.

$$G(x) \begin{cases} x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \\ x^0 - X_F(CCT; x_{pre}) = 0 \\ \text{end point } (x^u) \end{cases} \quad (3.15)$$

Variabel yang diperlukan ialah $X = (x^0, x^1, \dots, x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau)$

3.3 End Point

Titik akhir dari pencarian di tentukan dengan menggunakan nilai CUEP (*Controlling Unstable Equilibrium Point*) yang di dapat dengan menggunakan *energy function*. Fungsi ini akan menentukan nilai energi dari masing – masing generator. Generator dengan energi terbesar akan menjadi generator kritis. Generator inilah yang akan di analisis kestabilannya karena di anggap paling mudah kehilangan sinkronisasi saat terjadi gangguan.

Energi potensial dari setiap generator ditentukan menggunakan persamaan 3.16 dan energi potensial dari sistem dituliskan melalui persamaan 3.17.

$$Ep_i = [P_{mi} - (E_i)^2 G_{ii}][\theta_i - \theta_i^s] \quad (3.16)$$

$$Ep = \sum_i Ep_i \quad (3.17)$$

E_i adalah tegangan konstan generator. G_{ii} adalah konduktansi. θ_i^s adalah sudut daya dalam stabil mengarah pada *Stable Equalibrium Point* (SEP). Generator dengan nilai Ep yang paling besar akan menjadi generator kritis.

Dengan mempertimbangkan kondisi *end point* keadaan kritis setelah gangguan yang telah dituliskan pada persamaan 3.8 dapat diminimisasi menjadi persamaan 3.18.

$$\min_x \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)'(\mu^k) + (\mu^{m+1})'W(\mu^{m+1}) \right\} \quad (3.18)$$

Dimana, $X = (x^0, x^1, \dots, x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau)$, $x^k \in R^N$, $(k=0, \dots, m)$, $\varepsilon \in R$, $\tau \in R$. W adalah matriks pembobot dengan nilai yang besar untuk generator kritis dan untuk generator lainnya bernilai nol.

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.19)$$

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.20)$$

Kondisi batasan ditulis pada persamaan 3.21 dan 3.22 sebagai berikut.

$$x_0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.21)$$

$$\mu^m = x^{m+1} - x^u \quad (3.22)$$

3.4 Metode Newton-Raphson

Metode *Newton-Raphson* menggunakan nilai awal yang kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari iterasi pertama. Jika nilai *error* yang didapatkan sudah sesuai maka proses iterasi akan dihentikan. Pada perhitungan untuk penelitian ini X_s diaumsikan sebagai solusi dari $G(x)$. X_s didapatkan melalui persamaan 3.23.

$$X_s = X_0 + \Delta X \quad (3.23)$$

X_0 adalah inisialisasi awal dan ΔX adalah nilai *error*. Dengan menggunakan Deret Tylor tingkat dua didapat nilai $G(X)$ seperti pada persamaan 3.24.

$$G(X_0 + \Delta X) \cong G(X_0) + \left[\frac{\partial G(X_0)}{\partial X} \right] \Delta X \quad (3.24)$$

Jika nilai *error* yang didapatkan mendekati nol, persamaan 3.23 dapat ditulis ulang menjadi persamaan 3.25 dengan matriks *Jacobian* dirumuskan pada persamaan 3.26.

$$G(X_0) + J\Delta X \cong 0 \quad (3.25)$$

$$J = \frac{\partial G(X)}{\partial X} \quad (3.26)$$

3.4.1 Matriks Jacobian dan Persamaan Simultan

Variabel dari persamaan *Trapezoidal* dan parameter seperti daya aktif, sudut daya dan tegangan pada setiap generator akan dicari menggunakan matriks *Jacobian*. Matriks *Jacobian* akan diiterasi dengan metode *Newton Raphson*. Gambar 3.2 memperlihatkan dimensi dari matriks *Jacobian* awal. Sementara persamaan 3.27. memperlihatkan variabel dari matriks *Jacobian* awal yang digunakan.

Jumlah variabel dan jumlah persamaan yang dicari ialah $\text{NODE} \times \text{NG} \times (\text{m} + 2) + 2$ dan $\text{NODE} \times \text{NG} \times (\text{m} + 2)$. *End point* yang akan dimasukkan ke Matriks Jacobian ditulis dalam persamaan 3.30 dan 3.31.

Karena generator yang di amati adalah generator kritis, maka matriks jacobian baru hanya memiliki masing – masing satu untuk kecepatan sudut (ω) dan

sudut daya (θ). Hal ini menyebabkan dimensi dari matriks *Jacobian* berubah menjadi $\text{NODE} \times \text{NG} \times (m + 2) + 2$. Matriks *Jacobian* dengan kondisi *end point* dituliskan dalam persamaan 3.32. Jumlah variabel dan jumlah persamaan menjadi sama yaitu sebanyak $\text{NODE} \times \text{NG} \times (m + 2) + 2$ sehingga akan mempercepat perhitungan dan disebut persamaan simultan.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \text{NG x (m+2)} \quad \text{NG x (m+2)} \quad \text{NG x (m+2)} \quad \text{NG x (m+2)} \\
 \overbrace{\tilde{\omega}_1^0 \quad \dots \quad \tilde{\omega}_{NG}^{m+1}} \quad \overbrace{\theta_1^0 \quad \dots \quad \theta_{NG}^{m+1}} \quad \overbrace{E_1^0 \quad \dots \quad E_{NG}^{m+1}} \quad \overbrace{Pm_1^0 \quad \dots \quad Pm_{NG}^{m+1}} \quad \varepsilon \quad \tau
 \end{array} \\
 \begin{array}{c}
 \text{NG x (m+1)} \quad \text{NG x (m+1)} \quad \text{NG x (m+1)} \quad \text{NG x (m+1)} \quad \text{NG x (m+1)} \\
 \left[\begin{array}{c}
 \tilde{\omega}_1^0 \\
 \vdots \\
 \tilde{\omega}_{NG}^m \\
 \theta_1^0 \\
 \vdots \\
 \theta_{NG}^m \\
 E_1^0 \\
 \vdots \\
 E_{NG}^m \\
 Pm_1^0 \\
 \vdots \\
 Pm_{NG}^m \\
 f_{\tilde{\omega}_1} \\
 \vdots \\
 f_{\tilde{\omega}_{NG}} \\
 f_{\theta_1} \\
 \vdots \\
 f_{\theta_{NG}} \\
 f_{E_1} \\
 \vdots \\
 f_{E_{NG}} \\
 f_{Pm_1} \\
 \vdots \\
 f_{Pm_{NG}}
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}
 \quad \text{Jacobian Matriks}$$

NODE = Jumlah Persamaan Diferensial dari parameter yang dicari
NG = Jumlah Generator

Gambar 3.2 Konfigurasi dan Dimensi Matriks Jacobian

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{\tilde{\theta}i}^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_i^k}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{\tilde{\theta}i}^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_i^k}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial \theta_i^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial \theta_i^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial \theta_i^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial \theta_i^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial \theta_i^k}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{\tilde{\theta}i}^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_i^k}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial E_i^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial E_i^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial E_i^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial E_i^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial E_i^k}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{\tilde{\theta}i}^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_i^k}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial P_{mi}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial P_{mi}^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial P_{mi}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial P_{mi}^k}{\partial \tilde{\theta}_i^k} & \frac{\partial P_{mi}^k}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \tilde{\omega}_i^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial t} \\ 0 & \frac{\partial f}{\partial \theta_i^0} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial t} \\ 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial E_i^0} & 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial t} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial P_{mi}^0} & 0 & \frac{\partial f}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Dimana

$$f_i \equiv \begin{bmatrix} f_{\tilde{\omega}i} \\ f_{\tilde{\theta}i} \\ f_{Ei} \\ f_{Pmi} \end{bmatrix} = x_i^0 - X_F(CCT; x_{pre}) \quad (3.28)$$

$$g_i \equiv \begin{bmatrix} g_{\tilde{\omega}i} \\ g_{\tilde{\theta}i} \\ g_{Ei} \\ g_{Pmi} \end{bmatrix} = x_i^{k+1} - x_i^k - \frac{\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k}{|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k|} \varepsilon \quad (3.29)$$

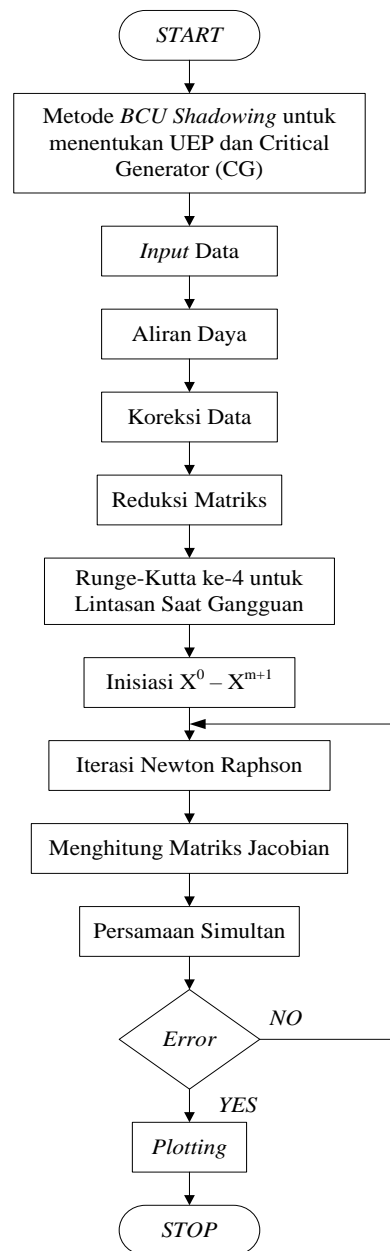
$$J1 = \theta_i^{m+1} - \theta_i^{CUEP} \rightarrow \frac{\partial J1}{\partial \theta^{m+1}} = [1] \quad (3.30)$$

$$J2 = \tilde{\omega}_i^{m+1} - \tilde{\omega}_i^{CUEP} \rightarrow \frac{\partial J2}{\partial \tilde{\omega}^{m+1}} = [1] \quad (3.31)$$

$$J_{NEW} = \begin{bmatrix} J \\ \frac{\partial J1}{\partial \theta^{m+1}} \\ \frac{\partial J2}{\partial \tilde{\omega}^{m+1}} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

3.5 Diagram Alir

Analisis kestabilan *transient* yang dilakukan selama penelitian diperlihatkan oleh diagram alir pada Gambar 3.1. Analisis dilakukan mulai dari mempersiapkan data awal, pembentukkan lintasan sampai perhitungan nilai CCT.

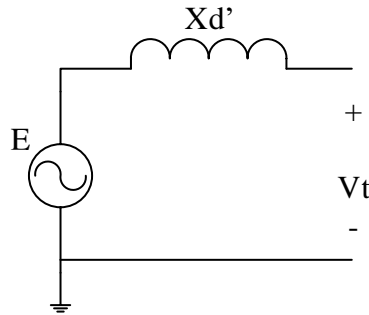


Gambar 3.3 Diagram Alir Analisis Kestabilan *Transient*

3.6 Permodelan Generator dan Sistem Tenaga

Generator yang digunakan pada simulasi adalah generator model klasik. Generator ini adalah generator dengan model paling sederhana dimana digambarkan sebagai sumber tegangan dan reaktansi (X_d') seperti pada Gambar 3.4.

Dimana E adalah tegangan dalam generator dan V_t adalah tegangan terminal generator.



Gambar 3.4. Model Generator Klasik

Sistem yang akan diuji adalah sistem dengan lebih dari satu generator atau multimesin. Beberapa sistem menggunakan konfigurasi *loop* dan lainnya radial. Sistem terdiri dari sumber, saluran dan beban. Saluran yang digunakan adalah *single circuit*. Saat terjadi gangguan, sistem dengan *single circuit* tidak akan bisa mengalirkan daya. Hal ini berbeda dengan sistem *loop* dimana jika salah satu saluran terkena gangguan, saluran lain masih bisa bekerja. Hal ini menyebabkan nilai reaktansi dari sistem dengan *double circuit* dan *single circuit* pada setiap keadaan baik sebelum, saat dan sesudah gangguan berbeda. Nilai reaktansi yang berbeda juga akan menyebabkan nilai arus yang berbeda dan pada akhirnya memberikan respon kestabilan sistem juga berbeda. Gangguan yang terjadi adalah gangguan tiga fasa ke tanah.

3.6.1 Sistem Tenaga Terhubung *Infinite Bus*

Sistem pada awalnya dihubungkan dengan *infinite bus* baik saat menggunakan konfigurasi *loop* maupun radial. Analisis kestabilan menggunakan *first swing equation* (persamaan ayunan pertama) seperti pada persamaan 3.33.

$$J\ddot{\theta}_m = T_a = T_m - T_e \quad (3.33)$$

Dimana

J : Momen kelembaman total dari massa rotor ($kg-m^2$)

θ_m : Pergeseran sudut rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*) (rad)

T_a : Torsi percepatan (Nm)

T_m : Torsi putar mekanis pada poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula (Nm)

T_e : Torsi putar elektrik (Nm)

Jika menggunakan referensi kecepatan sinkron, θ_m dapat dituliskan kembali seperti persamaan 3.34.

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (3.34)$$

Dimana

ω_{sm} : Kecepatan putar sinkron mekanik (rad/s)

δ_m : Pergeseran sudut rotor terhadap referensi putaran sinkron (rad)

Karena $\dot{\omega}_m = \ddot{\delta}_m$, persamaan ayunan dapat dirumuskan seperti 3.35

$$J\ddot{\delta}_m = J\dot{\omega}_m = T_a \quad (3.35)$$

Dimana ω_m adalah kecepatan sudut rotor dalam rad/s . Dengan mengalikan kedua sisi persamaan tersebut dengan ω_m dapat diperoleh persamaan 3.36 dan 3.37.

$$J\omega_m\ddot{\delta}_m = J\omega_m\dot{\omega}_m = \omega_m T_a = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (3.36)$$

$$J\omega_m\ddot{\delta}_m = J\omega_m\dot{\omega}_m = P_m - P_e \quad (3.37)$$

dimana :

P_m : daya mekanik generator

P_e : daya elektrik generator

Jika $J\omega_m$ dinotasikan sebagai M atau konstanta inersia, persamaan ayunan dapat dituliskan menjadi persamaan 3.38

$$M\ddot{\delta} = P_m - P_e \quad (3.38)$$

Bila memperhatikan torsi yang diberikan *damper winding (damping)*, maka persamaan ayunan menjadi persamaan 3.39.

$$M\ddot{\delta} = P_m - P_e - K_D \cdot \omega_m \quad (3.39)$$

Dimana K_D adalah koefisien *damping* dalam torsi pu. Torsi *base* sendiri dirumuskan seperti pada persamaan 3.40.

$$T_B = \frac{S_{Base}}{\omega_{m\ Base}} \quad (3.40)$$

Dimana $\omega_{m\ Base} = \omega_{sm}$.

3.6.2 Sistem Tenaga Tanpa *Infinite Bus*

Saat sistem dilepas dari *infinite bus*, sistem hanya bergantung dengan sumber dari generator. Generator yang digunakan terdiri dari generator kecil dan merupakan generator tersebar (*distributed generator*). Penggunaan *distributed generator* adalah salah satu ciri dari *Smart Grid*.

Kestabilan sistem digambarkan dengan persamaan ayunan menggunakan referensi *Center Of Inertia* (COI) yang dirumuskan pada persamaan 3.41. COI menggunakan konsep titik berat untuk menentukan referensi sudut dan kecepatan putar generator.

$$M_T \cdot \dot{\omega}_0 = \sum_{i=1}^n M_i \cdot \dot{\omega}_i = P_{COI} \quad (3.41)$$

Dimana:

- M_i : Konstanta Inersia dari generator i
- $\dot{\omega}_i$: Kecepatan putar generator i
- $\dot{\omega}_0$: Referensi kecepatan putar COI
- P_{COI} : Total daya mekanik semua generator.

Referensi COI di dapat dari persamaan 3.42, dan kecepatan putar dan sudut rotor yang baru dapat dilihat pada persamaan 3.43 dan 3.44. Sementara persamaan ayunan dengan menggunakan referensi COI dapat dituliskan pada persamaan 3.45.

$$\dot{\omega}_0 = \frac{1}{M_T} P_{COI} \quad (3.42)$$

$$\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0 \quad (3.43)$$

$$\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_0 \quad (3.44)$$

$$M_i \cdot \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - K_{Di} \cdot \tilde{\omega}_{mi} \quad (3.45)$$

3.7 Data Sistem Tenaga yang Dianalisis

Sistem tenaga yang akan dianalisis adalah sistem IEEE yang telah dimodifikasi dengan mengganti generator menjadi *distributed generator* dan kapasitas genarator dan beban dibatasi sampai 50 MW. Data sistem yang dibutuhkan adalah data resistansi dan reaktansi saluran, daya pembangkitan dan beban. Parameter generator yang diperlukan untuk analisis kestabilan *transient* adalah reaktansi *transient* generator (X_d') dan konstanta inersia generator (M).

3.7.1 Sistem IEEE 9 Bus

Sistem IEEE 9 Bus yang akan dianalisis dapat dilihat pada Gambar 3.5. Data dari sistem ini dapat dilihat pada Tabel 3.1, 3.2 dan 3.3. *Base* untuk sistem ialah sebagai berikut:

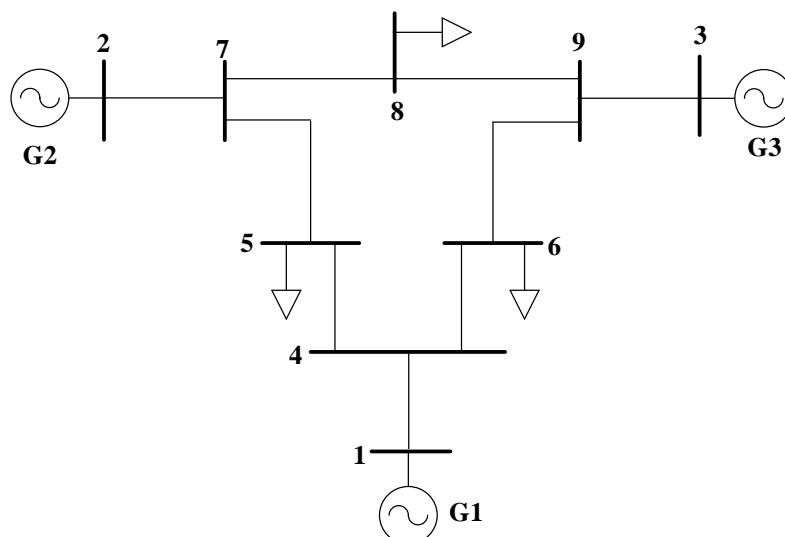
MVA *Base* : 100 MVA

KV *Base* : 6 KV

I *Base* : 9,6225 kA

Z *Base* : 0,36 Ω

T *Base* : 0,53 N.m ($\omega=750$ rpm)



Gambar 3.5 Sistem IEEE 9 Bus

Tabel 3.1 Data Generator pada Sistem IEEE 9 Bus

ID Generator	X_d' (pu)	M	K_D (pu)
G1	0,0608	0,1245	0,01
G2	0,1198	0,034	0,01
G3	0,1813	0,016	0,01

Tabel 3.2. Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 9 Bus

No. Bus	Tegangan Bus (pu)	Daya Pembangkitan		Daya Beban	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,04	2	0	0	0
2	1,025	16,3	6	0	0
3	1,025	0,85	6	0	0
4	1	0	0	0	0
5	1	0	0	12,5	5
6	1	0	0	9	3
7	1	0	0	0	0
8	1	0	0	10	3,5
9	1	0	0	0	0

Tabel 3.3 Data Saluran Sistem IEEE 9 Bus

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
1	1	4	0	0,00576
2	2	7	0	0,00625
3	3	9	0	0,00586
4	4	5	0,001	0,0085
5	4	6	0,0017	0,0092
6	5	7	0,0032	0,0161
7	6	9	0,0039	0,017
8	7	8	0,00085	0,0072
9	8	9	0,00119	0,01008

3.7.2 Sistem IEEE 16 Bus

Sistem IEEE 16 Bus adalah sistem distribusi dengan tiga generator seperti pada Gambar 3.6 dengan data jaringan dan generator seperti pada Tabel 3.4, 3.5 dan 3.6. *Base* sistem ialah sebagai berikut:

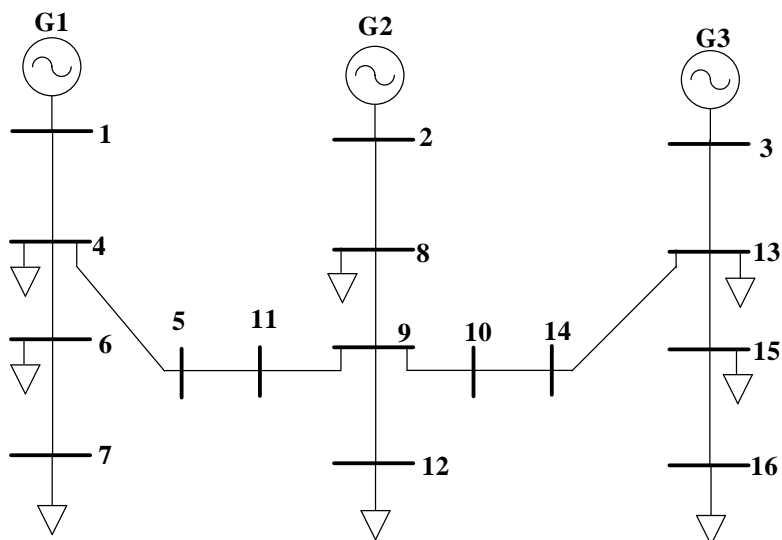
MVA *Base* : 100 MVA

KV *Base* : 6 KV

I *Base* : 9,6225 kA

Z *Base* : 0,36 Ω

T *Base* : 0,53 N.m ($\omega=750$ rpm)



Gambar 3.6 Sistem IEEE 16 Bus

Tabel 3.4 Data Generator pada Sistem IEEE 16 Bus

ID Generator	X_d' (pu)	M	K_D
G1	0,0608	0,125	0,01
G2	0,1198	0,034	0,01
G3	0,1813	0,016	0,01

. Tabel 3.5 Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 16 Bus

No. Bus	Tegangan Bus (pu)	Daya Pembangkitan		Daya Beban	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,025	10	5	0	0
2	1,03	20	15	0	0
3	1,025	10	5	0	0
4	1	0	0	2	1,6
5	1	0	0	3	1,5
6	1	0	0	2	0,8
7	1	0	0	1,5	1,2
8	1	0	0	4	2,7
9	1	0	0	5	3
10	1	0	0	1	0,9
11	1	0	0	0,6	0,1
12	1	0	0	4,5	2
13	1	0	0	1	0,9
14	1	0	0	1	0,7
15	1	0	0	1	0,9
16	1	0	0	2,1	1

Tabel 3.6 Data Saluran Sistem IEEE 16 Bus

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
1	1	8	0,075	0,1
2	2	4	0,11	0,11
3	3	13	0,11	0,11
4	4	5	0,08	0,11
5	4	6	0,09	0,18
6	5	11	0,04	0,04
7	6	7	0,04	0,04
8	8	9	0,08	0,11

Tabel 3.6 Data Saluran Sistem IEEE 16 Bus Lanjutan

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
9	8	10	0,11	0,11
10	9	11	0,11	0,11
11	9	12	0,08	0,11
12	10	14	0,04	0,04
13	13	14	0,09	0,12
14	13	15	0,08	0,11
15	15	16	0,04	0,04

3.7.3 Sistem IEEE 30 Bus

Data Sistem IEEE 30 Bus terdapat pada Tabel 3.7, 3.8 dan 3.9 dengan konfigurasi seperti pada Gambar 3.7. *Base* sistem sebagai berikut:

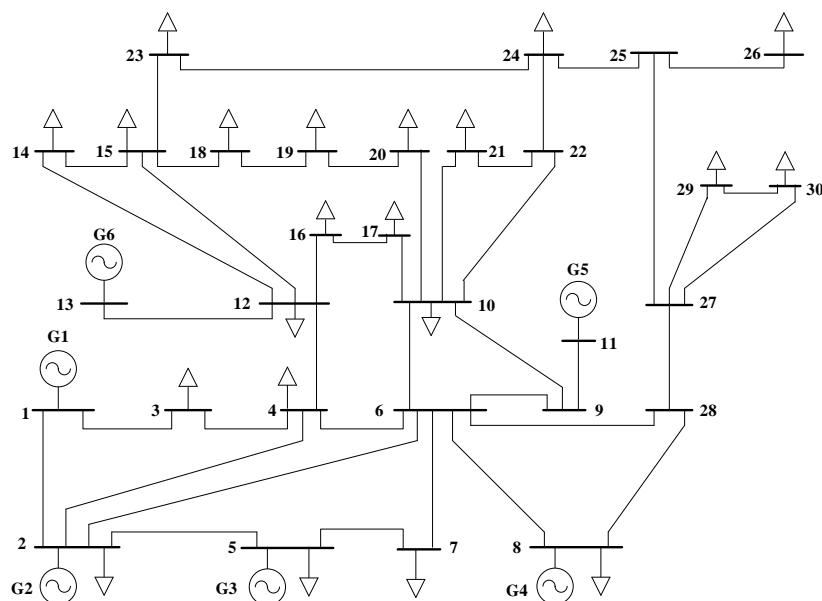
MVA Base : 100 MVA

KV Base : 6 KV

I Base : 9,6225 kA

Z Base : 0,36 Ω

T Base : 0,3 N.m ($\omega = 1000$ rpm)



Gambar 3.7 Sistem IEEE 30 Bus

Tabel 3.7 Data Generator pada Sistem IEEE 30 Bus

ID Generator	X_d' (pu)	M	K_D
G1	0,324	0,026	0,01
G2	0,232	0,0048	0,01
G3	0,232	0,0048	0,01
G4	0,174	0,0032	0,01
G5	0,174	0,0032	0,01
G6	0,174	0,0032	0,01

Tabel 3.8 Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 30 Bus

No. Bus	Tegangan Bus (pu)	Daya Pembangkitan		Daya Beban	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,06	26,02	0	0	0
2	1,045	4	5	2,17	1,27
3	1	0	0	0,24	0,12
4	1	0	0	0,76	0,16
5	1,01	1	3,7	9,42	1,9
6	1	0	0	0	0
7	1	0	0	2,28	1,09
8	1,01	1	3,73	3	3
9	1	0	0	0	0
10	1	0	0	0,58	0,2
11	1,082	1	1,62	0	0
12	1	0	0	1,12	0,75
13	1,071	1	1,06	0	0
14	1	0	0	0,62	0,16
15	1	0	0	0,82	0,25
16	1	0	0	0,35	0,18
17	1	0	0	0,9	0,58
18	1	0	0	0,32	0,09

Tabel 3.8 Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 30 Bus

Lanjutan

No. Bus	Tegangan Bus (pu)	Daya Pembangkitan		Daya Beban	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
19	1	0	0	0,95	0,34
20	1	0	0	0,22	0,07
21	1	0	0	1,75	1,12
22	1	0	0	0	0
23	1	0	0	0,32	0,16
24	1	0	0	0,87	0,67
25	1	0	0	0	0
26	1	0	0	0,35	0,23
27	1	0	0	0	0
28	1	0	0	0	0
29	1	0	0	0,24	0,09
30	1	0	0	1,06	0,19

Tabel 3.9 Data Saluran Sistem IEEE 30 Bus

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
1	1	2	0,0192	0,0575
2	1	3	0,0452	0,1852
3	2	4	0,057	0,1737
4	3	4	0,0132	0,0379
5	2	5	0,0472	0,1983
6	2	6	0,0581	0,1763
7	4	6	0,0119	0,0414
8	5	7	0,046	0,116
9	6	7	0,0267	0,082
10	6	8	0,012	0,042
11	6	9	0	0,208
12	6	10	0	0,556

Tabel 3.9 Data Saluran Sistem IEEE 30 Bus Lanjutan

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
13	9	11	0	0,208
14	4	12	0	0,256
15	12	13	0	0,14
16	12	14	0,1231	0,2559
17	12	15	0,0662	0,1304
18	12	16	0,0945	0,1987
19	14	15	0,221	0,1997
20	16	17	0,0824	0,1923
21	15	18	0,107	0,2185
22	18	19	0,0639	0,1292
23	19	20	0,034	0,068
24	10	20	0,0936	0,209
25	10	17	0,0324	0,0845
26	10	21	0,0348	0,0749
27	10	22	0,0727	0,1499
28	21	22	0,0116	0,0236
29	15	23	0,1	0,202
30	22	24	0,115	0,179
31	23	24	0,132	0,27
32	24	25	0,1885	0,3292
33	25	26	0,2544	0,38
34	25	27	0,1093	0,2087
35	27	28	0	0,396
36	27	29	0,2198	0,4153
37	27	30	0,3202	0,6027
38	29	30	0,2399	0,4533
39	8	28	0,0636	0,2
40	6	28	0,0169	0,0599
41	9	10	0	0,11

3.7.4 Sistem IEEE 57 Bus

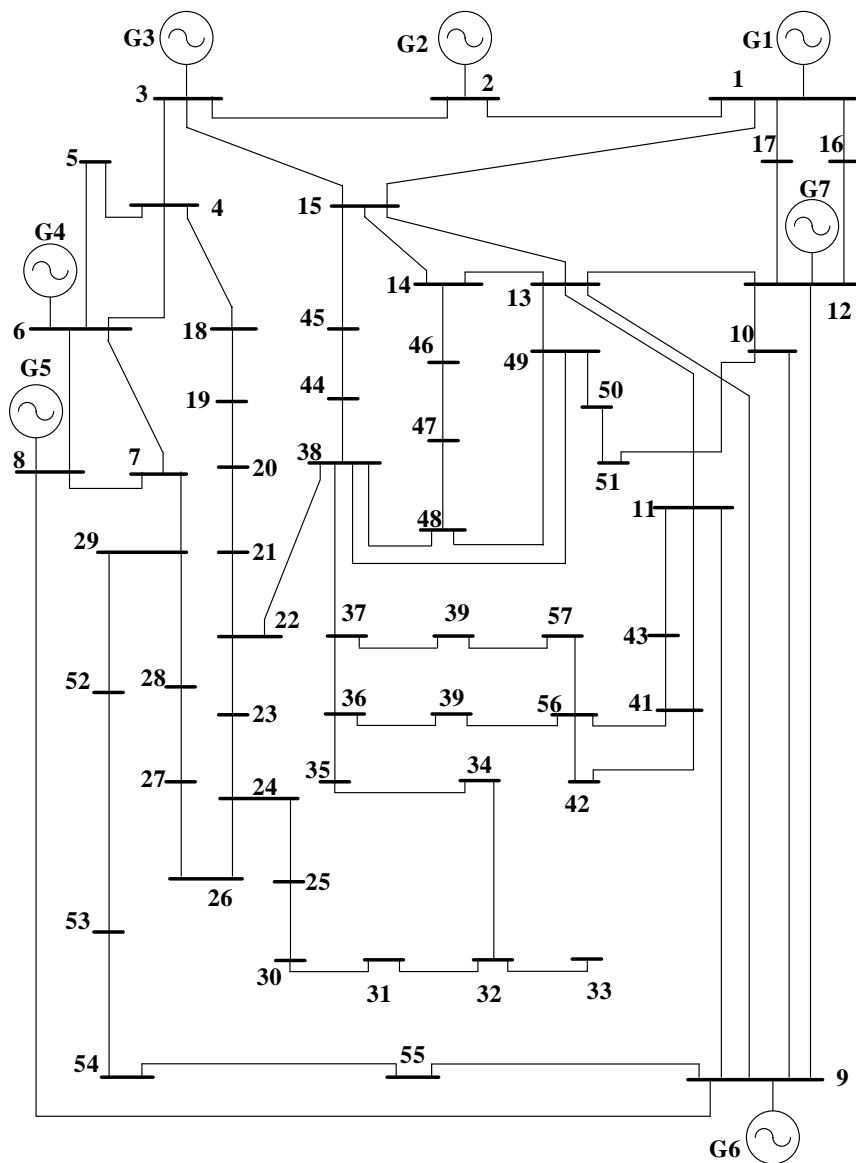
Sistem IEEE 57 Bus memiliki 7 generator seperti Gambar 3.8. Data yang digunakan ada pada Tabel 3.10, 3.11 dan 3.12. *Base* sistem sebagai berikut:

MVA *Base* : 100 MVAKV *Base* : 6 KV

I *Base* : 9,6225 kA

Z_{Base} : 0,36 Ω

T *Base* : 0,3 N.m ($\omega = 1000$ rpm)



Gambar 3.8 Sistem IEEE 57 Bus

Tabel 3.10 Data Generator pada Sistem IEEE 57 Bus

ID Generator	X_d' (pu)	M	K_D
G1	0,324	0,026	0,01
G2	0,232	0,0048	0,01
G3	0,232	0,0048	0,01
G4	0,174	0,0032	0,01
G5	0,174	0,0032	0,01
G6	0,174	0,0032	0,01
G7	0,174	0,0032	0,01

Tabel 3.11 Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 57 Bus

No. Bus	Tegangan Bus (pu)	Daya Pembangkitan		Daya Beban	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,04	3	0	0	0
2	1,01	8	0,08	0,3	8,8
3	0,985	8	0	4,1	2,1
4	1	0	0	0	0
5	1	0	0	1,3	0,4
6	0,98	8	0,08	7,5	0,2
7	1	0	0	0	0
8	1,005	17	6,21	15	2,2
9	0,98	21	0,22	12,1	2,6
10	1	0	0	0,5	0,2
11	1	0	0	0	0
12	1,015	43	12,85	37,7	2,4
13	1	0	0	1,8	0,23
14	1	0	0	1,05	0,53
15	1	0	0	2,2	0,5
16	1	0	0	4,3	0,3
17	1	0	0	4,2	0,8

Tabel 3.11 Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 57 Bus

Lanjutan

No. Bus	Tegangan Bus (pu)	Daya Pembangkitan		Daya Beban	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
18	1	0	0	2,72	0,98
19	1	0	0	0,33	0,06
20	1	0	0	0,23	0,1
21	1	0	0	0	0
22	1	0	0	0	0
23	1	0	0	0,63	0,21
24	1	0	0	0	0
25	1	0	0	0,63	0,32
26	1	0	0	0	0
27	1	0	0	0,93	0,05
28	1	0	0	0,46	0,23
29	1	0	0	1,7	0,26
30	1	0	0	0,36	0,18
31	1	0	0	0,58	0,29
32	1	0	0	0,16	0,08
33	1	0	0	0,38	0,19
34	1	0	0	0	0
35	1	0	0	0,6	0,3
36	1	0	0	0	0
37	1	0	0	0	0
38	1	0	0	1,4	0,7
39	1	0	0	0	0
40	1	0	0	0	0
41	1	0	0	0,63	0,3
42	1	0	0	0,71	0,44
43	1	0	0	0,2	0,1
44	1	0	0	1,2	0,18

Tabel 3.11 Data Daya Pembangkitan dan Beban pada Sistem IEEE 57 Bus

Lanjutan 1

No. Bus	Tegangan Bus (pu)	Daya Pembangkitan		Daya Beban	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
45	1	0	0	0	0
46	1	0	0	0	0
47	1	0	0	2,97	1,16
48	1	0	0	0	0
49	1	0	0	1,8	0,85
50	1	0	0	2,1	1,05
51	1	0	0	1,8	0,53
52	1	0	0	0,49	0,22
53	1	0	0	2	1
54	1	0	0	0,41	0,14
55	1	0	0	0,68	0,34
56	1	0	0	0,76	0,22
57	1	0	0	0,67	0,2

Tabel 3.12 Data Saluran Sistem IEEE 57 Bus

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
1	1	2	0,0083	0,028
2	2	3	0,0298	0,085
3	3	4	0,0112	0,0366
4	4	5	0,0625	0,132
5	4	6	0,043	0,148
6	6	7	0,02	0,102
7	6	8	0,0339	0,173
8	8	9	0,0099	0,0505
9	9	10	0,0369	0,1679
10	9	11	0,0258	0,0848

Tabel 3.12 Data Saluran Sistem IEEE 57 Bus Lanjutan 1

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
11	9	12	0,0648	0,295
12	9	13	0,0481	0,158
13	13	14	0,0132	0,0434
14	13	15	0,0269	0,0869
15	1	15	0,0178	0,091
16	1	16	0,0454	0,206
17	1	17	0,0238	0,108
18	3	15	0,0162	0,053
19	4	18	0	0,2423
20	5	6	0,0302	0,0641
21	7	8	0,0139	0,0712
22	10	12	0,0277	0,1262
23	11	13	0,0223	0,0732
24	12	13	0,0178	0,058
25	12	16	0,018	0,0813
26	12	17	0,0397	0,179
27	14	15	0,0171	0,0547
28	18	19	0,461	0,685
29	19	20	0,283	0,434
30	20	21	0	0,7767
31	21	22	0,0736	0,117
32	22	23	0,0099	0,0152
33	23	24	0,166	0,256
34	24	25	0	0,6028
35	24	26	0	0,0473
36	26	27	0,165	0,254
37	27	28	0,0618	0,0954
38	28	29	0,0418	0,0587

Tabel 3.12 Data Saluran Sistem IEEE 57 Bus Lanjutan 2

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
39	7	29	0	0,0648
40	25	30	0,135	0,202
41	30	31	0,326	0,497
42	31	32	0,507	0,755
43	32	33	0,0392	0,036
44	32	34	0	0,953
45	34	35	0,052	0,078
46	35	36	0,043	0,0537
47	36	37	0,029	0,0366
48	37	38	0,0651	0,1009
49	37	39	0,0239	0,0379
50	36	40	0,03	0,0466
51	22	38	0,0192	0,0295
52	11	41	0	0,749
53	41	42	0,207	0,352
54	41	43	0	0,412
55	38	44	0,0289	0,0585
56	15	45	0	0,1042
57	14	46	0	0,0735
58	46	47	0,023	0,068
59	47	48	0,0182	0,0233
60	48	49	0,0834	0,129
61	49	50	0,0801	0,128
62	50	51	0,1386	0,22
63	10	51	0	0,0712
64	13	49	0	0,191
65	29	52	0,1442	0,187
66	52	53	0,0762	0,0984

Tabel 3.12 Data Saluran Sistem IEEE 57 Bus Lanjutan 3

No.	Bus Awal	Bus Akhir	R (pu)	X (pu)
67	53	54	0,1878	0,232
68	54	55	0,1732	0,2265
69	11	43	0	0,153
70	44	45	0,0624	0,1242
71	40	56	0	1,195
72	41	56	0,553	0,549
73	42	56	0,2125	0,354
74	39	57	0	1,355
75	56	57	0,174	0,26
76	38	49	0,115	0,177
77	38	48	0,0312	0,0482

BAB 4

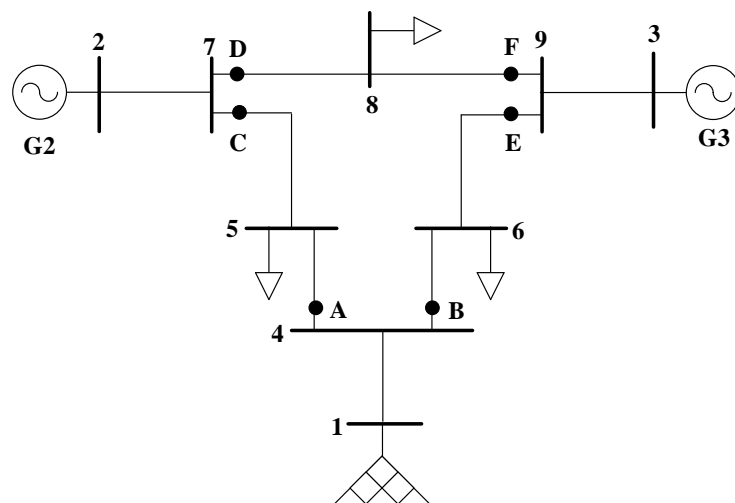
Pengujian dilakukan pada beberapa sistem untuk menguji keefektifan metode. Sistem yang digunakan adalah sistem multimesin, yaitu IEEE 9 Bus, IEEE 30 Bus, IEEE 57 Bus dan IEEE 16 Bus. Gangguan yang terjadi adalah gangguan 3 fasa pada saluran, dimana lokasi gangguan dekat dengan bus. Saluran pada sistem adalah *single circuit*, dimana jika terjadi gangguan *Circuit Breaker* (CB) pada ujung – ujung saluran akan terbuka dan menyebabkan saluran lepas dari bus. Akibat pembukaan CB ini gangguan akan hilang.

Perhitungan dilakukan menggunakan program yang dijalankan pada komputer dengan *processor* Intel® Core™ i5-7200U CPU 2.71Ghz, RAM sebesar 4.00 GB dan *Windows 10 Education* sebagai sistem operasi. Waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan program akan berbeda jika menggunakan komputer dengan spesifikasi yang berbeda.

4.1 Hasil Perhitungan CCT Saat Sistem Terhubung *Infinite Bus*

4.1.1 Hasil Perhitungan Pada Sistem IEEE 9 Bus

Sistem IEEE 9 Bus dimodifikasi dengan menghubungkan bus 1 pada *Infinite Bus* seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Sistem IEEE 9 Bus yang Dimodifikasi

Tabel 4.1 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 9 Bus dengan *Infinite Bus*

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Nilai CUEP			CG
		<i>Grid</i>	G2	G3	
A	4 – 5	0	0,0671	3,1153	G3
B	4 – 6	0	0,0521	3,1136	G3
C	7 – 5	0	3,1945	0,0724	G2
D	7 – 8	0	3,1696	0,0088	G2
E	9 – 6	0	0,0529	3,1715	G3
F	9 – 8	0	0,0165	3,1737	G3

Tabel 4.2 Nilai CCT pada Sistem IEEE 9 Bus Tanpa *Damping* Terhubung *Infinite Bus*

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
A	4 – 5	1,7322	G3	0,2725	1,5-1,8	6,927
B	4 – 6	1,7907	G3	0,1731	1,75-1,8	8,532
C	7 – 5	1,081	G2	0,1306	1,05-1,1	6,945
D	7 – 8	1,0793	G2	0,132	1,05-1,1	6,891
E	9 – 6	1,0345	G3	0,1666	1,03-1,04	4,653
F	9 – 8	1,0364	G3	0,1603	1,0-1,04	8,592

Tabel 4.3 Nilai CCT pada Sistem IEEE 9 Bus dengan Mempertimbangkan *Damping* dan Terhubung dengan *Infinite Bus*

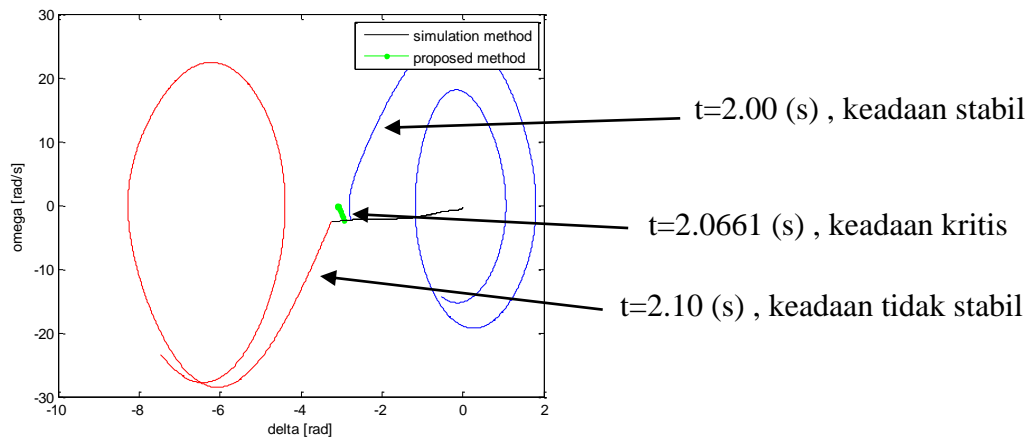
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
A	4 – 5	2,1958	G3	0,1817	2-2,2	7,28
B	4 – 6	2,0661	G3	0,1093	2-2,1	7,034
C	7 – 5	1,1499	G2	0,1262	1,1-1,2	6,909
D	7 – 8	1,1478	G2	0,1198	1,1-1,2	7,016
E	9 – 6	1,1741	G3	0,1245	1,2-1,2	4,927
F	9 – 8	1,1762	G3	0,1185	1,2-1,2	6,972

Tabel 4.4. Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 9 Bus yang Dimodifikasi

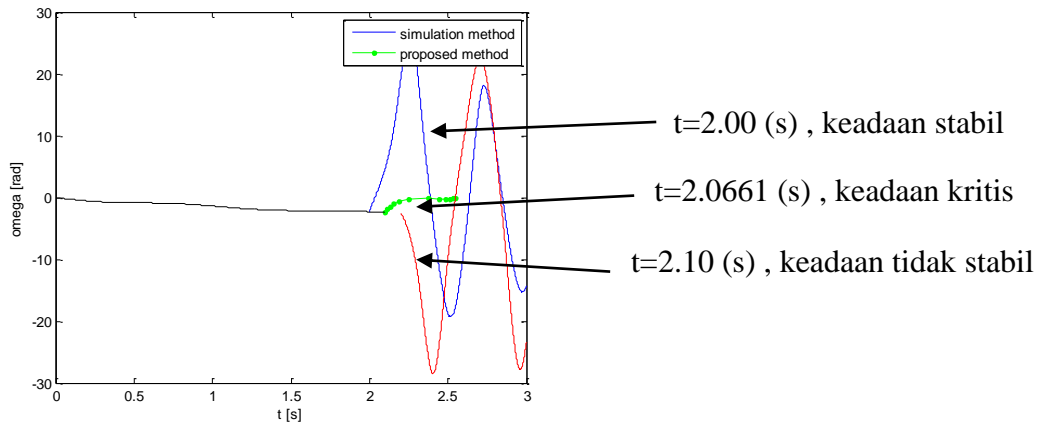
<i>ID Sumber</i>	<i>V (pu)</i>	<i>P (pu)</i>
<i>Grid</i>	1,0400 + 0,0000i	0,067
G2	1,0391 + 0,0018i	0,163
G3	1,0391 + 0,0010i	0,085

Sistem IEEE 9 Bus modifikasi memiliki 2 pembangkit dan satu sumber dari *infinite bus*. Nilai CUEP pada masing – masing generator ada pada Tabel 4.1. Setelah parameter awal didapatkan, dilakukan perhitungan CCT menggunakan metode *critical trajectory* dengan hasil pada Tabel 4.2 dan 4.3. Hasil perhitungan dengan metode TDS juga dilakukan sebagai pembandingan dari metode *critical trajectory*. Tabel 4.2 merupakan hasil perhitungan dengan mengabaikan faktor redaman dari *damper winding*. Jika faktor redaman sebesar 1 % dimasukkan ke dalam persamaan ayunan yang dijadikan dasar analisis, akan menghasilkan nilai seperti pada Tabel 4.3. Nilai tegangan terminal dan daya dari setiap sumber terlihat pada Tabel 4.4.

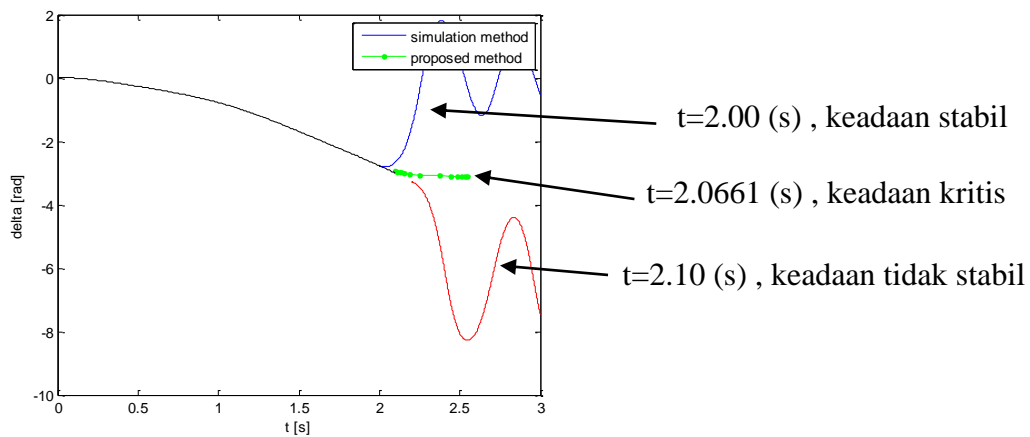
Nilai CCT yang didapat dari metode *critical trajectory* pada semua titik gangguan yang diuji, berada dalam rentang waktu hasil perhitungan metode TDS. Penambahan *damping* juga dapat menaikkan nilai CCT pada semua titik gangguan. Gambar 4.2, 4.3 dan 4.4 menggambarkan generator dalam waktu stabil (biru) sampai kritis (hijau) dan kemudian tidak stabil (merah). Waktu yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT dengan menggunakan metode *critical trajectory* lebih cepat dibandingkan dengan metode TDS.



Gambar 4.2 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' dengan *damping*



Gambar 4.3 Kurva kecepatan putar rotor (ω) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' dengan *damping*

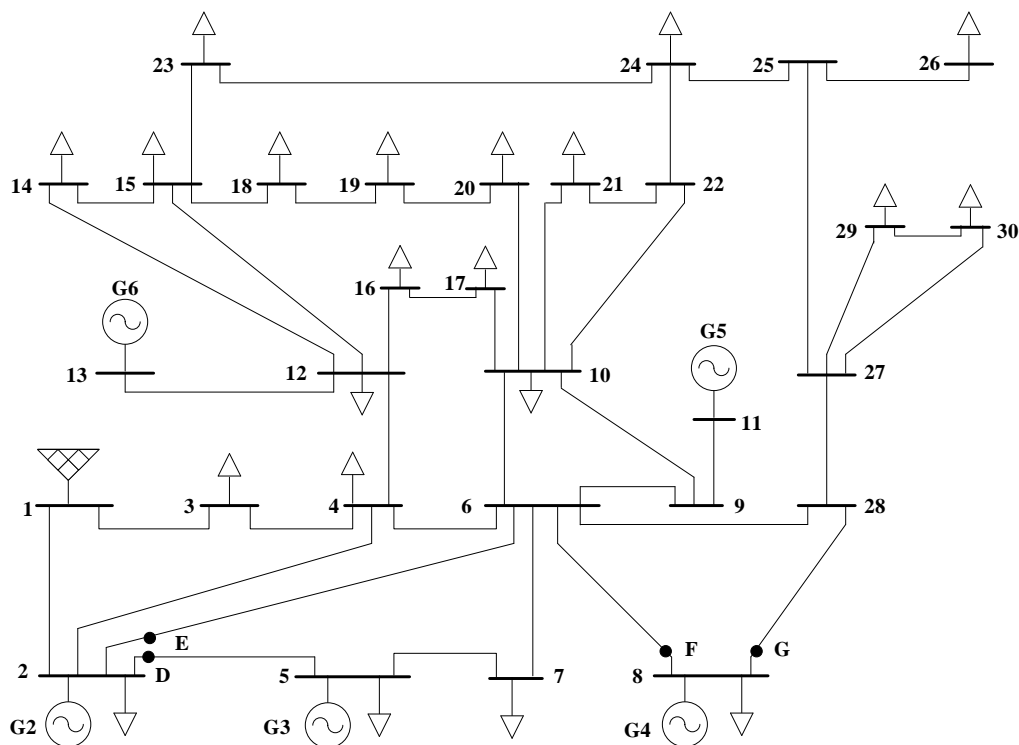


Gambar 4.4 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' dengan *damping*.

4.1.2 Hasil Perhitungan Pada Sistem IEEE 30 Bus

Sistem IEEE 30 Bus dengan empat generator dihubungkan pada *infinite bus* di bus 1 kemudian dihitung nilai CCT dari titik gangguan yang telah ditentukan. Sebelum itu nilai CUEP dan generator kritis harus dicari terlebih dahulu untuk data awal seperti pada Tabel 4.5. Hasil perhitungan CCT pada Tabel 4.6 dan 4.7 memperlihatkan bahwa saat tidak menggunakan *damping* nilai CCT dari metode *critical trajectory* sesuai dengan metode TDS. Saat menggunakan *damping* terdapat *error* sebesar 14 % dari titik gangguan 'F'. Untuk nilai tegangan dan daya sumber dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Gambar 4.6, 4.7 dan 4.8 memperlihatkan keadaan dari generator G2 saat dalam kondisi stabil atau gangguan dihilangkan sebelum generator kehilangan sinkronisasi, kritis atau saat generator berada di kondisi sesaat sebelum kehilangan sinkronisasinya dan tidak stabil atau kondisi saat gangguan terlambat dihilangkan. Keadaan stabil dan tidak stabil didapat dari metode TDS dan keadaan kritis dari metode *critical trajectory*.



Gambar 4.5. Sistem IEEE 30 Bus Terhubung *Infinite Bus*

Tabel 4.5 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 30 Bus dengan *Infinite Bus*

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Nilai CUEP						CG
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	
D	2 - 5	0	3,1695	0,0242	0,0005	0,0316	0,0028	G2
F	8 - 6	0	0,0465	0,1026	0,0956	0,0801	0,1136	G6

Tabel 4.6 Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus Tanpa *Damping* Terhubung *Infinite Bus*

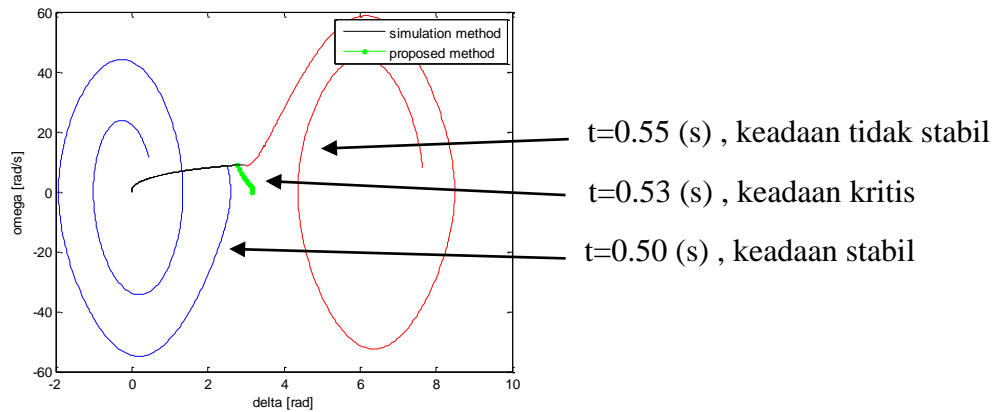
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
D	2 - 5	0,4446	G2	0,444	0,42-0,45	2,352
F	8 - 6	0,3358	G6	0,2564	0,27-0,35	2,414

Tabel 4.7 Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus dengan Mempertimbangkan *Damping* dan Terhubung dengan *Infinite Bus*

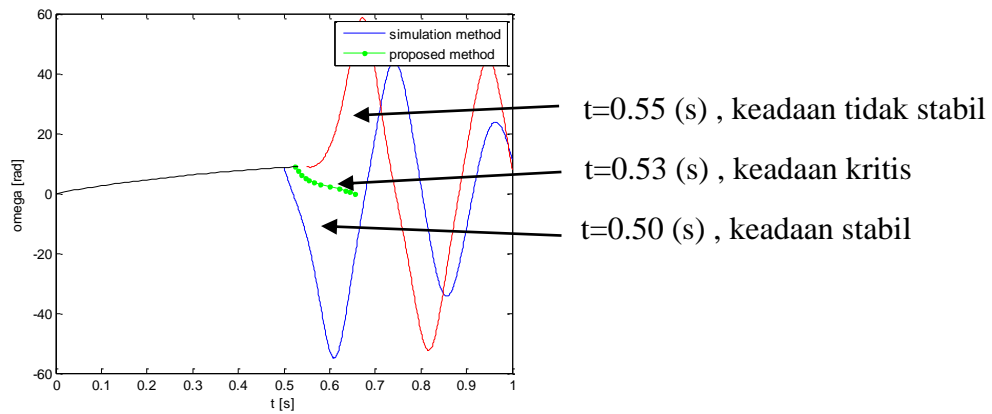
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
D	2 - 5	0,5301	G2	0,2674	0,5-0,55	2,416
F	8 - 6	0,4918	G6	0,452	0,40-0,43	2,305

Tabel 4.8 Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 30 Bus

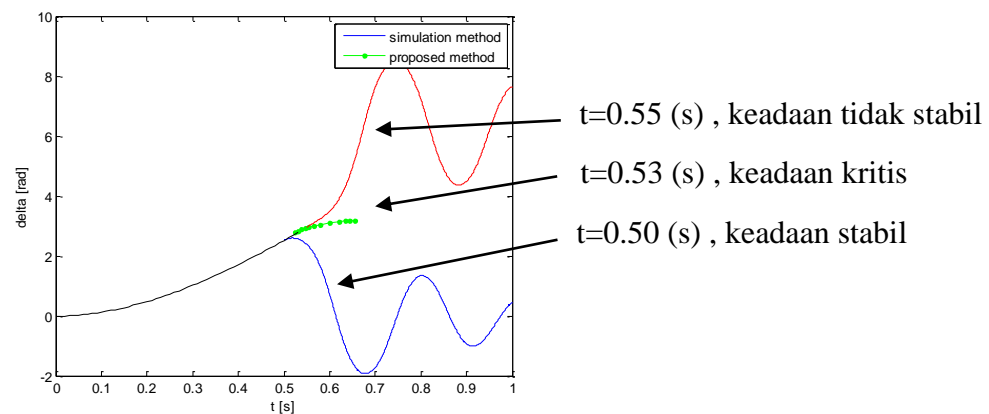
<i>ID Sumber</i>	V (pu)	P (pu)
<i>Grid</i>	1,0514 - 0,0185i	0,025
G2	1,0461 - 0,0249i	0,1333
G3	1,0509 - 0,0214i	0,371
G4	1,0490 - 0,0241i	0,524
G5	1,0503 - 0,0225i	0,1605
G6	1,0487 - 0,0268i	0,2764



Gambar 4.6 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' dengan *damping*



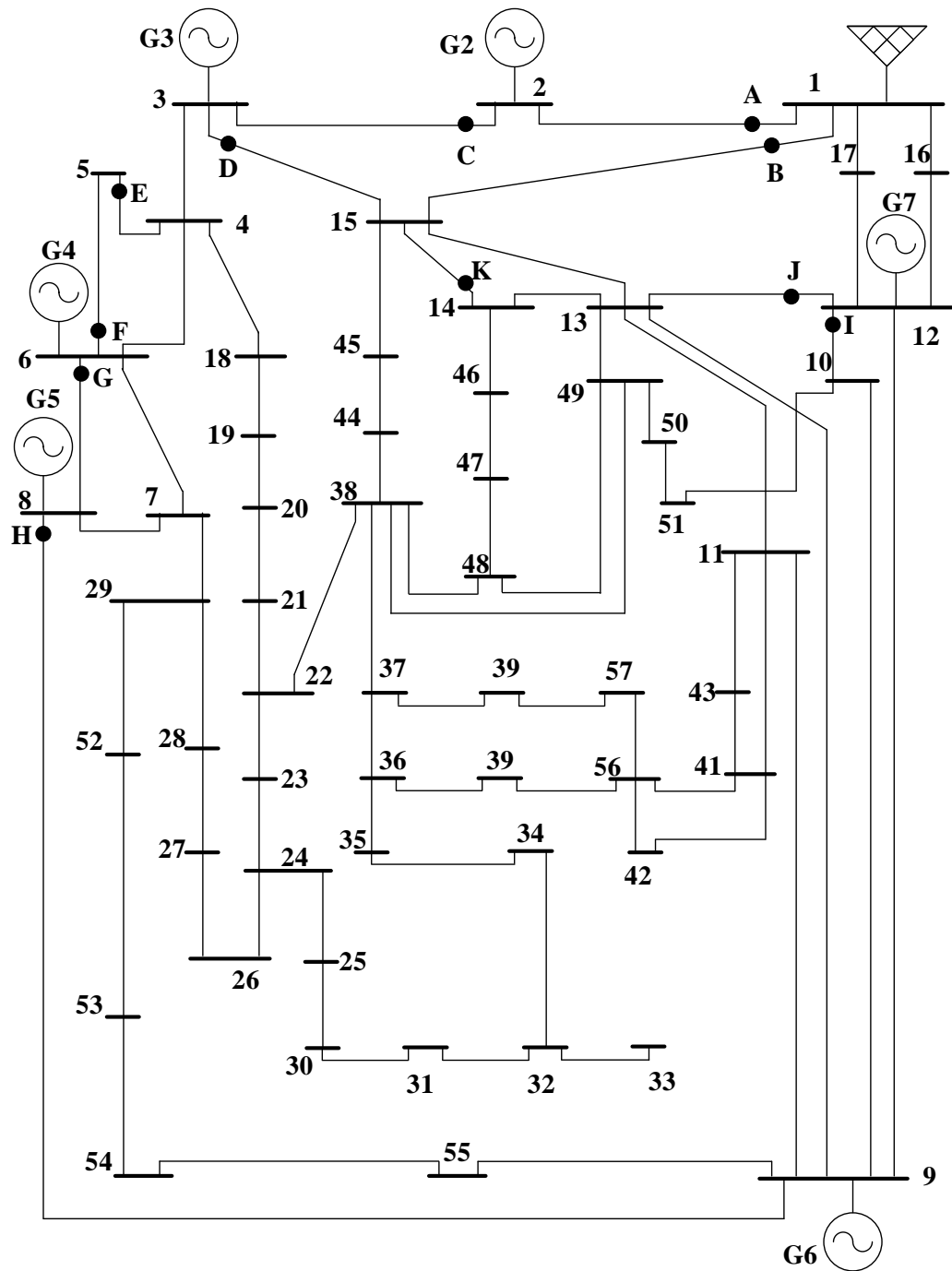
Gambar 4.7 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' dengan *damping*



Gambar 4.8 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' dengan *damping*.

4.1.3 Hasil Perhitungan Pada Sistem IEEE 57 Bus

Sama seperti pada Sistem IEEE 30 Bus, Sistem IEEE 57 Bus juga dihubungkan ke *infinite bus* melalui bus 1. Sistem IEEE 57 Bus memiliki tujuh sumber berupa 1 *grid* dan 6 generator seperti pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Sistem IEEE 57 Bus Terhubung *Infinite Bus*

Nilai CUEP dan generator kritis dituliskan pada Tabel 4.9. Pertama, CCT dihitung dengan mengabaikan *damper winding* dengan hasil seperti pada Tabel 4.10. Kemudian nilai *damper winding* sebesar 1 % dimasukkan dalam perhitungan dan menghasilkan nilai CCT seperti pada Tabel 4.11. Pada Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 juga dapat dilihat perbandingan hasil perhitungan CCT saat menggunakan metode TDS dan saat menggunakan metode *critical trajectory*. Nilai CCT yang didapatkan dari metode *critical trajectory* berada dalam rentang waktu dari metode TDS pada semua titik gangguan yang diamati. Waktu yang dibutuhkan oleh metode *critical trajectory* juga lebih cepat dibandingkan dengan metode TDS. Tabel 4.12 memperlihatkan nilai tegangan terminal dan daya dari setiap sumber.

Keadaan sudut rotor dan kecepatan putar dari generator yang diamati terlihat pada Gambar 4.10, 4.11 dan 4.12. Ketiga gambar tersebut menggambarkan keadaan generator kritis saat terjadi gangguan dengan tiga kemungkinan penanganan. Jika gangguan dihilangkan sebelum nilai CCT terpenuhi maka gene-

Tabel 4.9 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 57 Bus Terhubung dengan *Infinite Bus*

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Nilai CUEP							CG
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	
D	3 – 15	0,0003	0,0262	3,1604	0,0911	0,1427	0,0451	0,0421	G3
E	4 – 5	0,0002	0,0255	0,1549	3,1597	0,1131	0,0571	0,0555	G4
F	6 – 5	0,0001	0,0313	0,1109	0,1687	0,3072	3,0825	0,0514	G6
G	6 – 8	0,0002	0,0147	0,0705	0,0958	0,2861	3,2631	0,1767	G6

Tabel 4.10 Nilai CCT pada Sistem IEEE 57 Bus Tanpa *Damping* Terhubung *Infinite Bus*

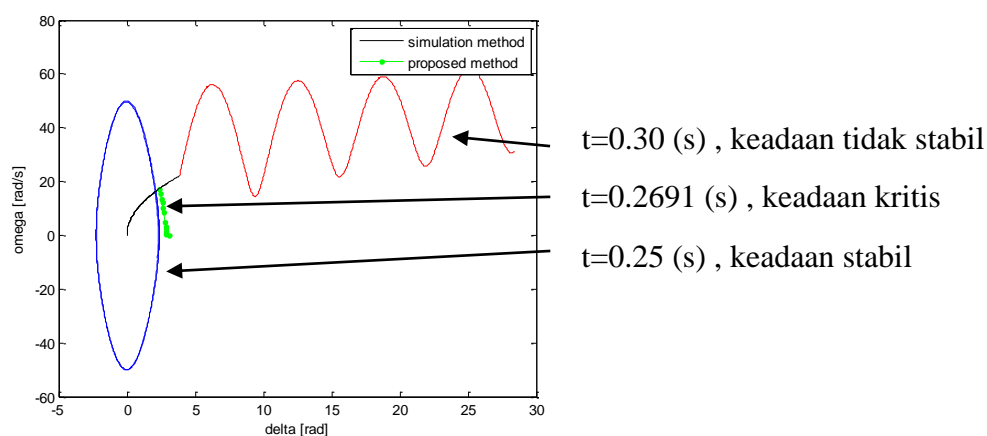
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
D	3 - 15	0,2689	G3	0,4171	0,25-0,4	2,471
E	4 - 5	0,1432	G4	0,4176	0,13-0,15	2,466
F	6 - 5	0,1773	G6	0,4014	0,15-0,2	5,081
G	6 - 8	0,1821	G6	0,3515	0,15-0,2	2,538

Tabel 4.11 Nilai CCT pada Sistem IEEE 57 Bus dengan Mempertimbangkan *Damping* dan Terhubung dengan *Infinite Bus*

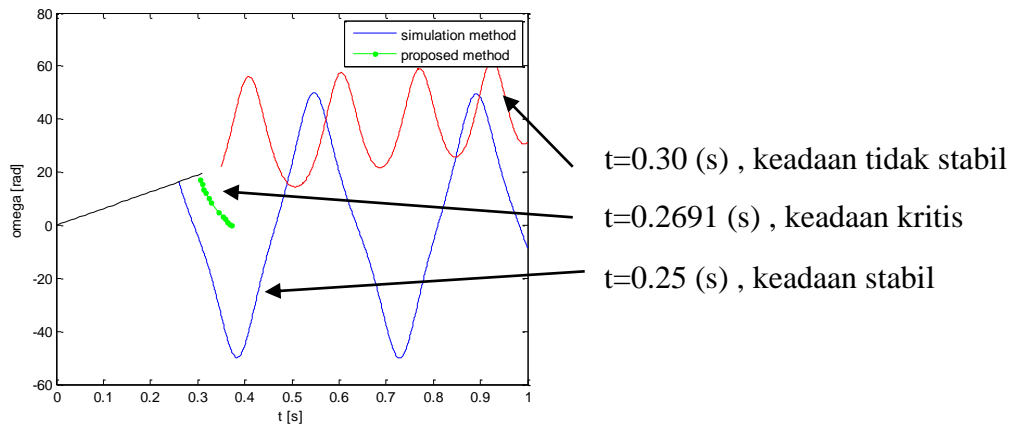
Fault Point	Open Line	Metode Critical Trajectory			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
D	3 - 15	0,2691	G3	0,5225	0,25-0,3	2,499
E	4 - 5	0,183	G4	0,5204	0,14-0,19	2,484
F	6 - 5	0,2011	G6	0,5707	0,16-0,25	5,174
G	6 - 8	0,1819	G6	0,4895	0,18-0,2	2,409

Tabel 4.12 Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 57 Bus

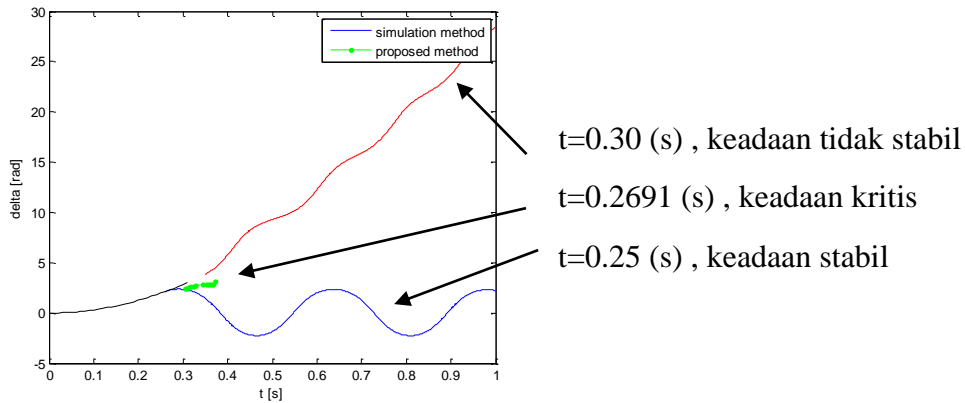
ID Sumber	V (pu)	P (pu)
Grid	1,0400 + 0,0000i	0,2931
G2	1,0433 - 0,0036i	0,0408
G3	1,0522 - 0,0145i	0,2508
G4	1,0543 - 0,0173i	0,6136
G5	1,0560 - 0,0199i	1,6942
G6	1,0562 - 0,0199i	0,2357
G7	1,0550 - 0,0177i	0,3739



Gambar 4.10 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa *damping*



Gambar 4.11 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa *damping*



Gambar 4.12 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa *damping*.

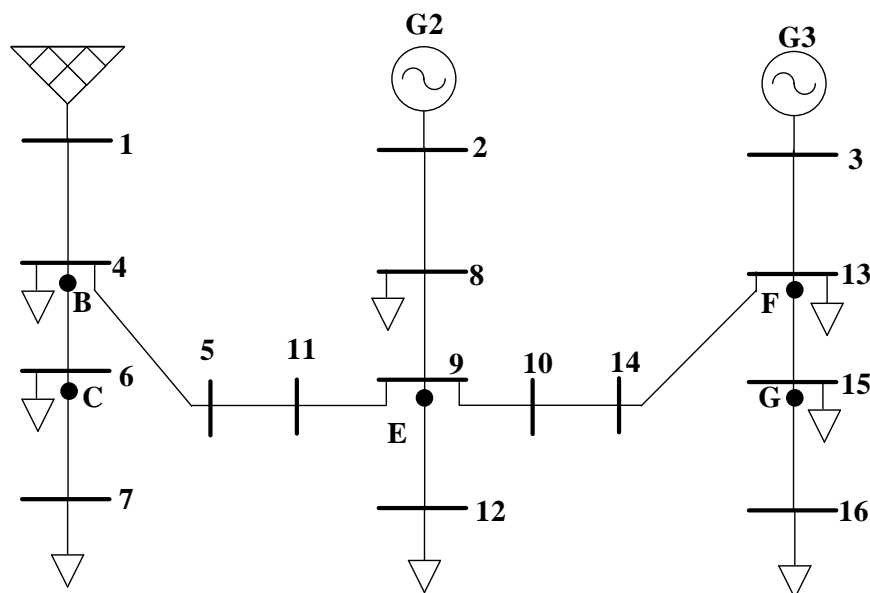
rator akan stabil seperti pada grafik warna biru. Jika gangguan terlambat diatasi maka generator akan kehilangan sinkronisasi seperti grafik warna merah. Keadaan saat generator berada diantara stabil dan tidak stabil ditandai dengan grafik warna hijau yang didapatkan dari metode *critical trajectory*.

4.1.4 Hasil Perhitungan Pada Sistem IEEE 16 Bus

Sistem IEEE 16 Bus memiliki 16 bus dengan 3 sumber yang mengalirkan daya listrik, yaitu dua generator dan satu *grid* *Grid* yang dihubungkan ke sistem pada bus 1. Pertama dilakukan perhitungan CUEP untuk mencari generator kritis antara 2 generator yang dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Selanjutnya dilakukan perhitungan menggunakan metode TDS untuk menentukan keadaan stabil dan tidak stabil dari generator kritis. Kemudian keadaan saat generator kritis dicari menggunakan metode *critical trajectory*. Dari Tabel 4.14 dan Tabel 4.15 terlihat bahwa nilai CCT dari metode *critical trajectory* berada pada rentang waktu dari hasil perhitungan metode TDS pada titik – titik gangguan yang diuji. Tabel 4.14 adalah nilai CCT tanpa memperhatikan *dampers winding*, sedangkan Tabel 4.15 memperlihatkan nilai CCT dengan memperhatikan koefisien *dampers winding* sebesar 1 %. Untuk nilai tegangan dan daya dari setiap sumber dituliskan pada Tabel 4.16.

Gambar 4.14 memperlihatkan grafik sudut rotor terhadap kecepatan putar dari generator kritis. Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 masing – masing memperlihatkan kecepatan putar dan sudut daya generator terhadap waktu. Gambar 4.14, Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 memperlihatkan keadaan generator berdasarkan tiga kondisi pada masing – masing gambar. Kondisi yang dimaksud adalah kondisi saat gangguan ditangani sebelum nilai CCT nya terpenuhi, kondisi saat nilai CCT terpenuhi tetapi gangguan belum hilang dan saat kondisi kritis atau nilai CCT itu sendiri.



Gambar 4.13. Sistem IEEE 16 Bus

Tabel 4.13 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 16 Bus dengan *Infinite Bus*

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Nilai CUEP			CG
		G1	G2	G3	
B	4-6	0	2,1064	0,256	G2
C	6-7	0	2,0983	0,2554	G2
G	15-16	0	0,23	2,1124	G3

Tabel 4.14 Nilai CCT pada Sistem IEEE 16 Bus Tanpa *Damping* Terhubung *Infinite Bus*

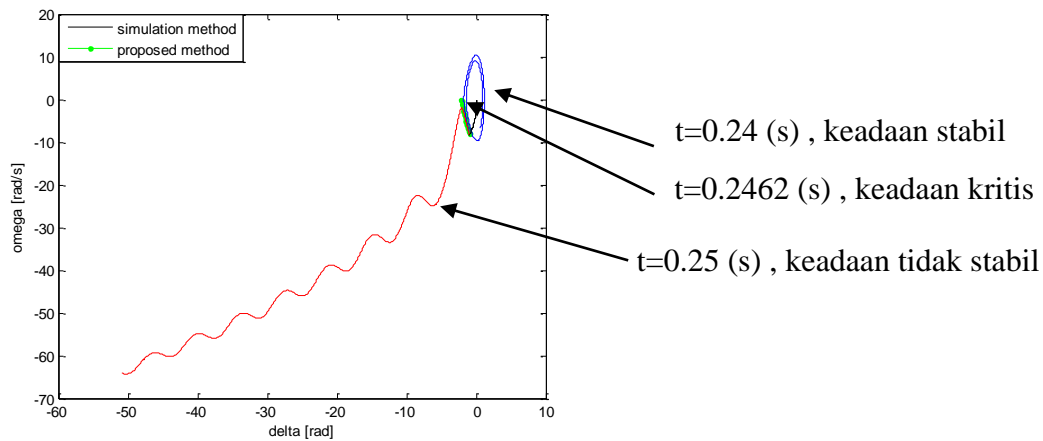
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Proposed Method			Simulation	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
B	4-6	0,1489	G2	0,1246	0,14-0,15	4,77
C	6-7	0,3493	G2	0,179	0,32-0,36	4,684
G	15-16	0,229	G3	0,1206	0,22-0,23	4,602

Tabel 4.15 Nilai CCT pada Sistem IEEE 16 Bus dengan Mempertimbangkan *Damping* dan Terhubung dengan *Infinite Bus*

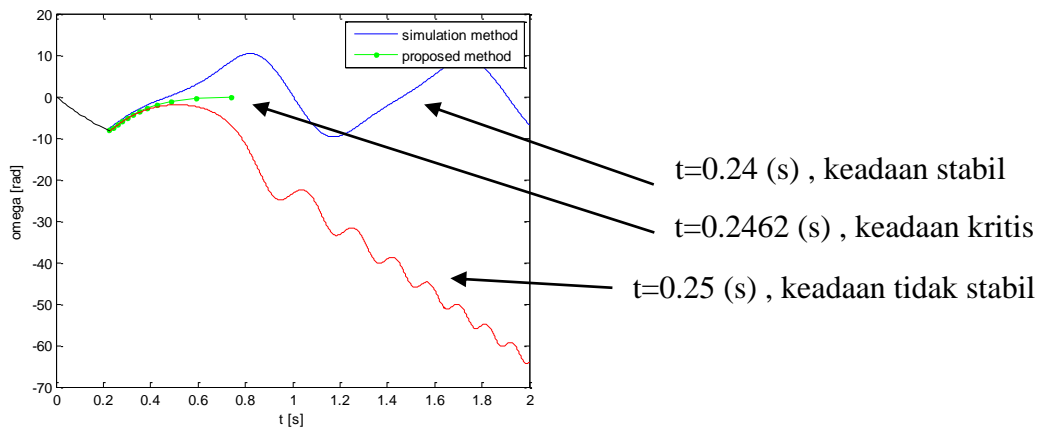
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Proposed Method			Simulation	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
B	4-6	0,1561	G2	0,1334	0,15-0,16	4,791
C	6-7	0,3757	G2	0,1081	0,37-0,38	7,112
G	15-16	0,2462	G3	0,1218	0,24-0,25	4,922

Tabel 4.16 Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 16 Bus

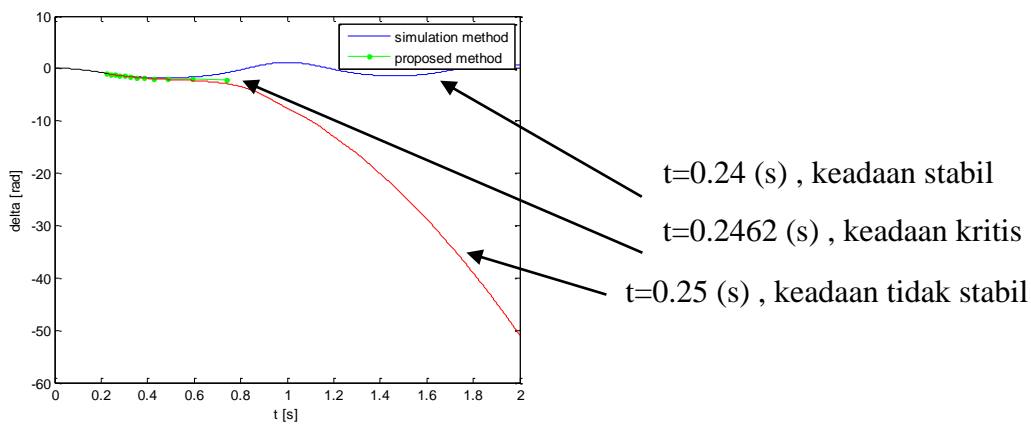
<i>ID Sumber</i>	V (pu)	P (pu)
<i>Grid</i>	1,0250 + 0,0000i	0,001
G2	1,0251 + 0,0899i	0,2
G3	1,0173 + 0,0470i	0,1



Gambar 4.14 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'G' dengan *damping*



Gambar 4.15 Kurva kecepatan putar rotor (ω) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'G' dengan *damping*



Gambar 4.16 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'G' dengan *damping*.

4.2 Hasil Perhitungan CCT Saat Sistem tanpa *Infinite Bus*

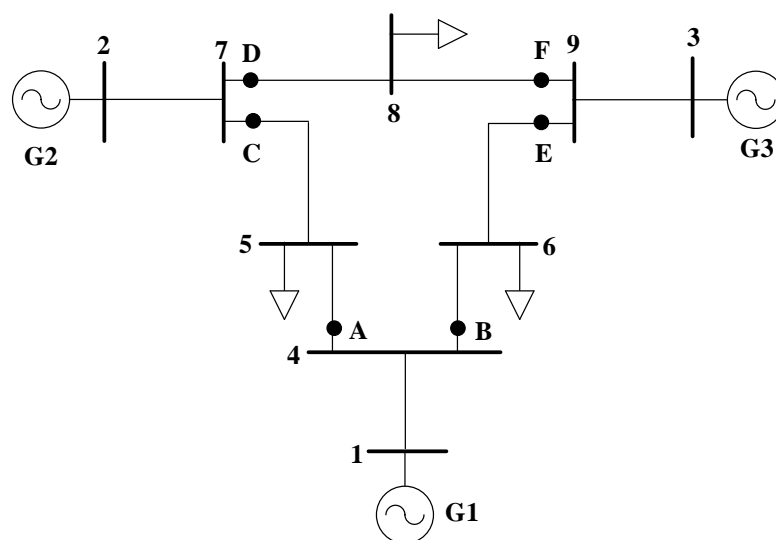
Pada awalnya sistem memiliki dua jenis sumber yang menghasilkan daya listrik yaitu *infinite bus* dan generator. Saat *infinite bus* terlepas dari sistem maka sistem hanya didukung oleh generator tersebar yang ada di jaringan. Bus 1 yang pada awalnya terhubung *infinite bus* dimasukkan generator yang akan berfungsi sebagai generator *swing*.

Perhitungan dilakukan dengan kondisi sama seperti saat sistem terhubung *infinite bus*, dimana gangguan terjadi pada saluran dekat bus tertentu, yang kemudian diatasi dengan melepas CB pada kedua ujung saluran. Gangguan yang terjadi adalah gangguan tiga fasa ke tanah. Saluran yang digunakan adalah *single circuit*.

4.2.1 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 9 Bus tanpa *Infinite Bus*

Sistem IEEE 9 Bus memiliki 3 generator dengan 1 generator *swing* pada bus 1. Pada sistem ini terdapat 6 titik gangguan yang diperlihatkan pada Gambar 4.17. Sebelum mulai perhitungan dengan metode *critical trajectory*, dibutuhkan data CUEP untuk menentukan generator kritis seperti pada Tabel 4.17.

Perhitungan dilakukan menggunakan dua metode yaitu metode TDS dan metode *critical trajectory*. Hasil perbandingan kedua metode dapat dilihat pada Tabel 4.18 dan 4.19. Tabel 4.18 memperlihatkan nilai CCT tanpa memperhatikan



Gambar 4.17 Sistem IEEE 9 Bus tanpa *Infinite Bus*

damper winding pada perhitungannya. Sedangkan Tabel 4.19 adalah nilai CCT dengan memperhatikan koefisien *damper winding* sebesar 1 % di perhitungannya. Dari tabel 4.18 dan 4.19 terlihat bahwa *damper winding* dapat meningkatkan nilai CCT karena dapat meredam osilasi saat gangguan. Nilai tegangan terminal dan daya dari generator diperlihatkan pada Tabel 4.20.

Nilai CCT dari metode *critical trajectory* berada pada rentang waktu dari nilai CCT pada metode TDS. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 4.18, Gambar 4.19, dan Gambar 4.20 yang menggambarkan kecepatan rotor dan sudut daya dari generator kritis. Dari gambar terlihat bahwa nilai dari metode *critical trajectory* berada diantara nilai dari metode TDS. Nilai CCT juga diketahui langsung pada metode *critical trajectory*.

Tabel 4.17 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 9 Bus

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Nilai CUEP			CG
		G1	G2	G3	
A	4 – 5	0,8941	2,2477	2,231	G2
B	4 – 6	0,8925	2,1749	2,3736	G3
C	7 – 5	0,6234	2,5475	0,5278	G2
D	7 – 8	0,6064	2,5296	0,6228	G2
E	9 – 6	0,2996	0,2424	2,863	G3
F	9 – 8	0,2889	0,2836	2,8668	G3

Tabel 4.18. Nilai CCT pada Sistem IEEE 9 Bus Tanpa *Damping*

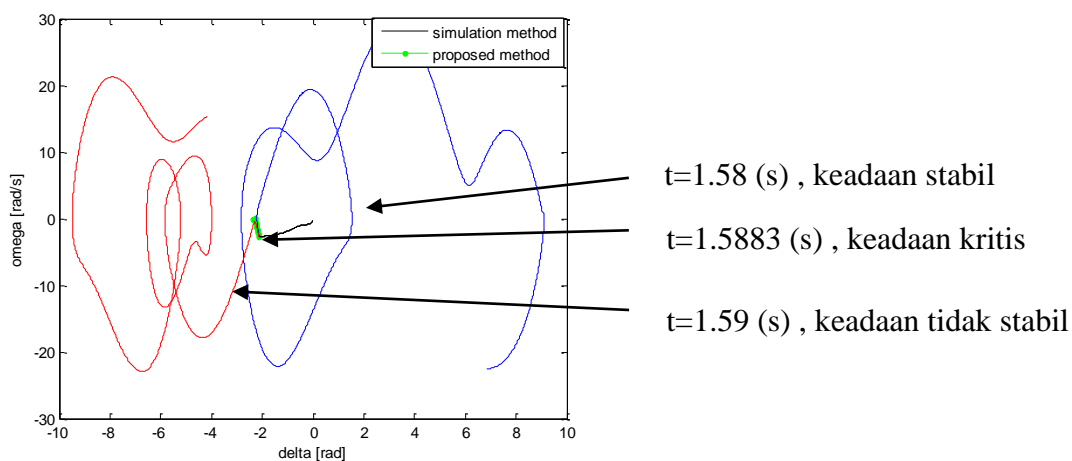
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
A	4 – 5	1,5855	G2	0,626	1,55-1,60	6,295
B	4 – 6	1,5883	G3	0,2269	1,58-1,59	6,015
C	7 – 5	0,8459	G2	0,1315	0,84-0,85	5,981
D	7 – 8	0,8429	G2	0,2765	0,84-0,85	2,895
E	9 – 6	0,8178	G3	0,1281	0,8-0,85	2,885
F	9 – 8	0,8161	G3	0,2526	0,80-0,82	6,075

Tabel 4.19. Nilai CCT pada Sistem IEEE 9 Bus dengan Mempertimbangkan *Damping*

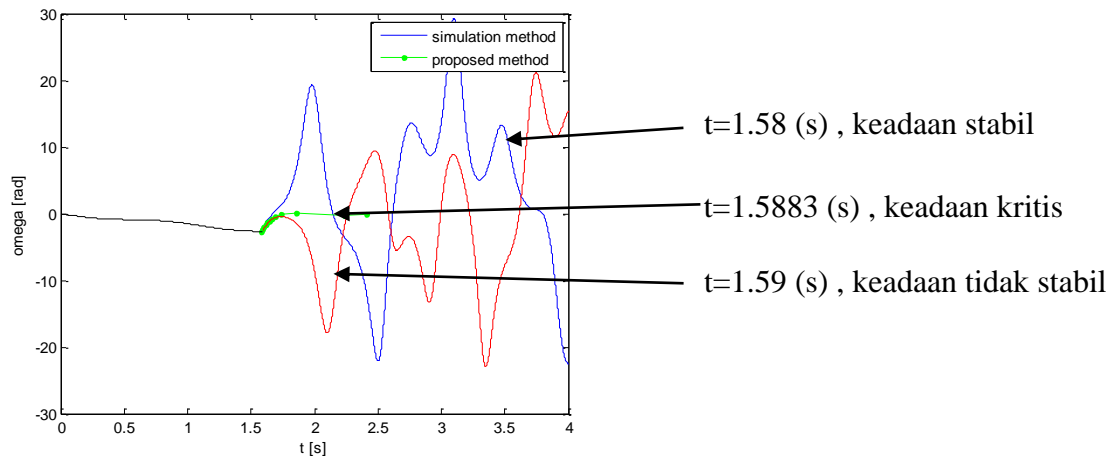
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
B	4 - 6	1,9351	G3	0,2604	1,7-2,0	5,951
C	7 - 5	0,8868	G2	0,3158	0,85-0,9	6,339
D	7 - 8	0,8756	G2	0,2447	0,87-0,89	2,855
E	9 - 6	0,8963	G3	0,2561	0,88-0,9	6,166
F	9 - 8	0,8955	G3	0,2614	0,85,0,95	3,099

Tabel 4.20 Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 9 Bus tanpa *Infinite Bus*

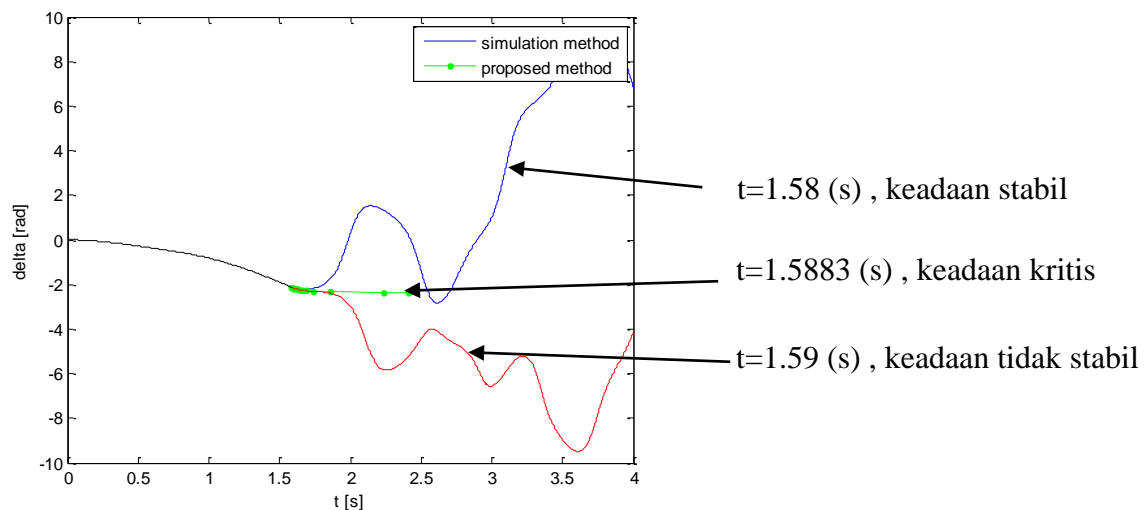
<i>ID Sumber</i>	V (pu)	P (pu)
G1	1,0400 + 0,0000i	0,067
G2	1,0391 + 0,0018i	0,163
G3	1,0391 + 0,0010i	0,085



Gambar 4.18. Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa *damping*



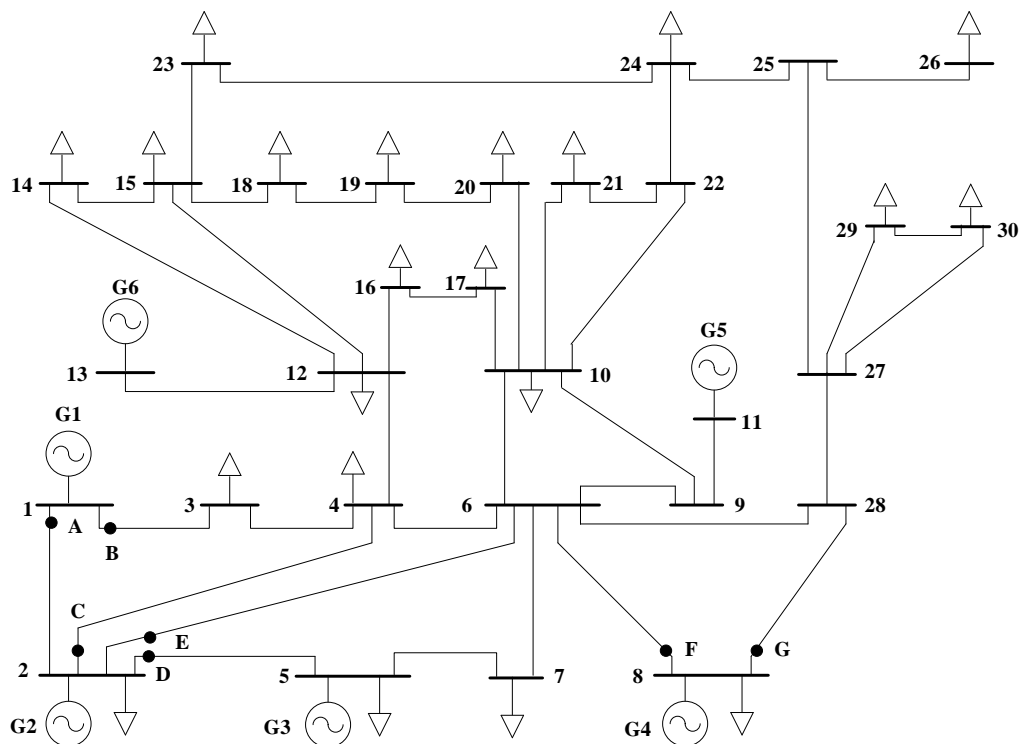
Gambar 4.19 Kurva kecepatan putar rotor (ω) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa *damping*



Gambar 4.20 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa *damping*.

4.2.2 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 30 Bus tanpa *Infinite Bus*

Sistem IEEE 30 bus memiliki 1 generator *swing* pada bus 1 dan 5 generator lainnya. Hal pertama yang dilakukan adalah mencari nilai CUEP untuk menentukan *end point* seperti pada Tabel 4.21. Hasil perhitungan menggunakan metode *critical trajectory* dan metode TDS ada pada Tabel 4.22 dan 4.23. Dari kedua tabel terlihat bahwa nilai CCT dari metode *critical trajectory* sesuai dengan nilai CCT dari metode TDS pada semua titik yang diuji.



Gambar 4.21. Sistem IEEE 30 Bus tanpa *Infinite Bus*

Tabel 4.21 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 30 Bus

Fault Point	Open Line	Nilai CUEP						CG
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	
A	1 - 2	1,2607	1,6998	1,7457	1,7172	1,6826	1,6753	G3
B	1 - 3	1,2879	1,6623	1,7795	1,7832	1,7558	1,7624	G4
C	2 - 4	1,2909	1,6767	1,7884	1,781	1,7537	1,7562	G3
D	2 - 5	1,2958	1,6537	1,8461	1,781	1,7502	1,7473	G3
E	2 - 6	1,2915	1,6703	1,7891	1,7873	1,7603	1,7565	G3
F	8 - 6	0,0574	0,4603	0,5517	3,0076	0,501	0,5221	G4
G	8 - 28	0,0536	0,4451	0,5876	2,8547	0,4059	0,4641	G4

Tabel 4,22 merupakan hasil perhitungan tanpa memperhatikan nilai faktor peredam sedangkan Tabel 4.23 adalah hasil dari perhitungan dengan memperhatikan koefisien *dampers winding* sebesar 1 %. Penambahan redaman ini akan membantu generator pulih dengan lebih cepat sehingga nilai CCT akan naik.

Dari kedua tabel juga terlihat bahwa waktu yang dibutuhkan metode *critical trajectory* lebih cepat dibanding metode TDS. Gambaran mengenai keadaan generator saat gangguan diperlihatkan pada Gambar 4.22, 4.23 dan 4.24. Ketiga gambar tersebut memperlihatkan keadaan generator kritis saat gangguan diatasi sebelum waktu CCT nya terpenuhi, keadaan saat gangguan terlambat diatasi dan saat keadaan kritis.

Tabel 4.22 Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus Tanpa *Damping*

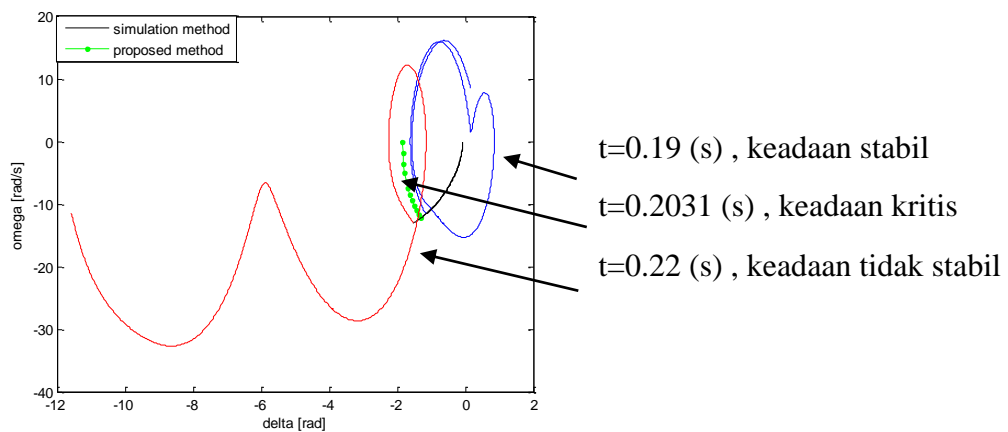
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
A	1 – 2	0,1752	G3	0,3104	0,16-0,19	1,674
B	1 – 3	0,1885	G4	0,1986	0,17-0,20	1,547
C	2 – 4	0,2128	G3	0,2838	0,20-0,22	1,573
D	2 – 5	0,2031	G3	0,2407	0,19-0,22	1,46
E	2 – 6	0,2127	G3	0,2676	0,20-0,22	1,476
F	8 – 6	0,641	G4	0,2708	0,4-0,7	1,588
G	8 – 28	0,6307	G4	0,1908	0,5-0,7	1,437

Tabel 4.23 Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus dengan Mempertimbangkan *Damping*

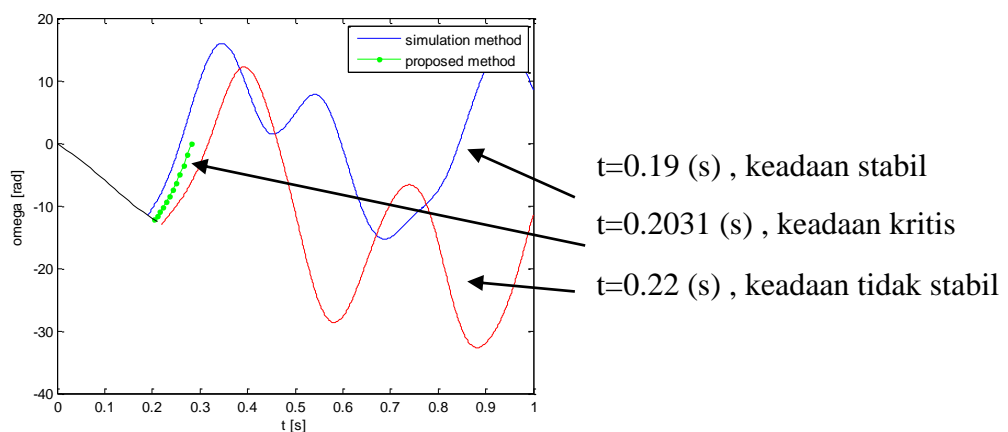
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
A	1 – 2	0,2271	G3	0,4345	0,18-0,25	0,1587
B	1 – 3	0,2141	G4	0,4335	0,2-0,25	0,1551
C	2 – 4	0,245	G3	0,2406	0,2-0,3	0,1578
D	2 – 5	0,2373	G3	0,2653	0,2-0,25	0,1622
E	2 – 6	0,2447	G3	0,2343	0,2-0,27	0,1613
F	8 – 6	0,9256	G4	0,3077	0,9-1	0,3178
G	8 – 28	0,8987	G4	0,2351	0,85-0,95	0,3201

Tabel 4.24 Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 30 Bus tanpa *Infinite Bus*

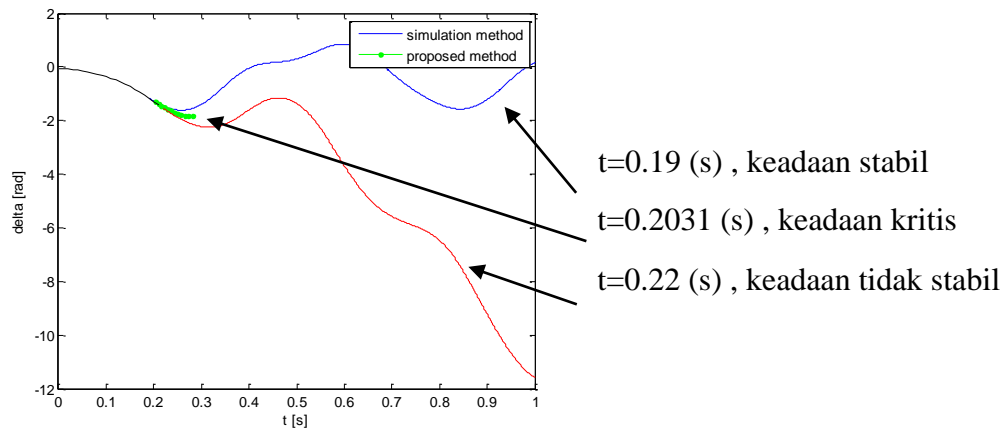
ID Sumber	V (pu)	P (pu)
<i>Grid</i>	1,0500 + 0,0000i	0,2452
G2	1,0509 - 0,0103i	0,0183
G3	1,0521 - 0,0156i	0,0942
G4	1,0514 - 0,0185i	0,03
G5	1,0461 - 0,0249i	0
G6	1,0509 - 0,0214i	0



Gambar 4.22 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa *damping*



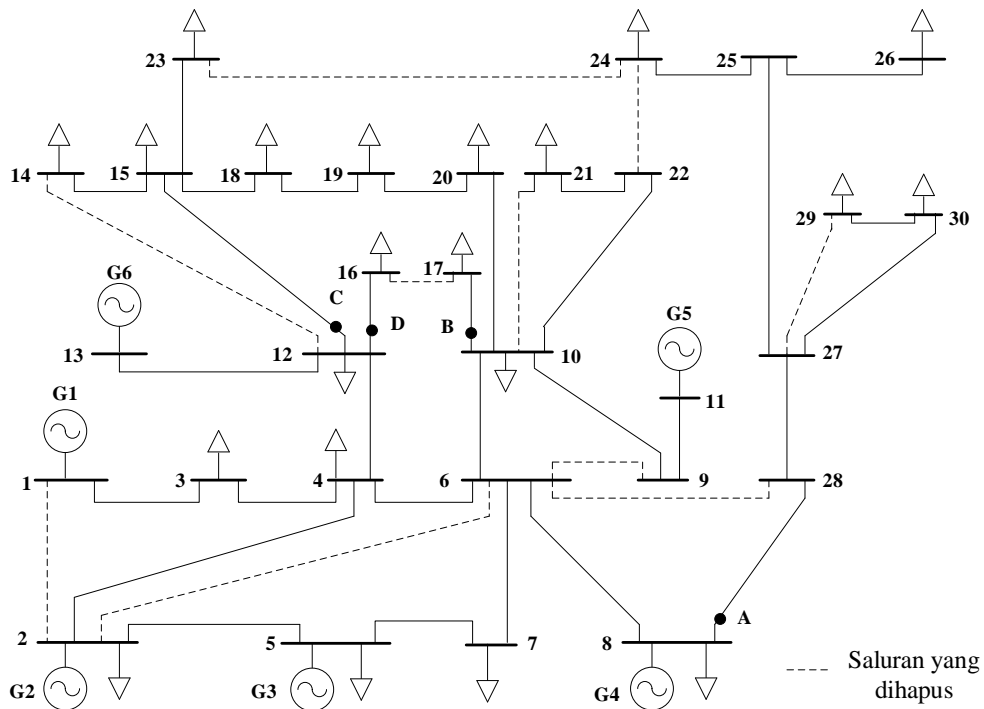
Gambar 4.23 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'D' tanpa *damping*



Gambar 4.24 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa *damping*.

4.2.2.1 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 30 Bus Modifikasi tanpa Infinite Bus

Sistem IEEE 30 Bus yang awalnya memiliki konfigurasi *loop* di rekonfigurasi menjadi sistem dengan konfigurasi radial dengan cara melepas beberapa saluran.



Gambar 4.25 Sistem IEEE 30 Bus Modifikasi

Hasil perhitungan CUEP dan generator kritis di tampilkan pada Tabel 4.25. Sementara hasil perhitungan metode ditampilkan pada Tabel 4.26 dan 4.27. Kedua tabel memperlihatkan nilai CCT dari kedua metode sudah sesuai pada semua titik gangguan yang diuji. Waktu perhitungan dari metode *critical trajectory* lebih cepat dibandingkan metode TDS. Penambahan *damper winding* juga mempengaruhi perhitungan dimana nilai CCT menjadi lebih lama. Nilai tegangan dan daya dari setiap generator dapat dilihat pada dilihat pada Tabel 4.28.

Gambar 4.26, 4.27 dan 4.28 memperlihatkan kondisi generator kritis saat terkena gangguan. Gambar mewakili 3 keadaan, yaitu saat stabil yang diwakili dengan grafik warna biru, tidak stabil dengan grafik warna merah dan kritis yang digambarkan dengan grafik warna hijau. Dua keadaan pertama di dapat dari metode TDS dan keadaan terakhir dari metode *critical trajectory*.

Tabel 4.25 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 30 Bus yang Dimodifikasi

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Nilai CUEP						CG
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	
A	8-28	0,5219	0,002	2,8516	0,0593	0,0531	0,0404	G3
B	10-17	0,1615	0,3095	0,3092	0,2996	2,9371	0,3973	G5
C	12-15	0,1692	0,2937	0,3194	0,2912	0,307	2,8929	G6
D	12-16	0,1263	0,3156	0,3506	0,3286	0,5286	2,8829	G6

Tabel 4.26 Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus yang Dimodifikasi Tanpa Damping

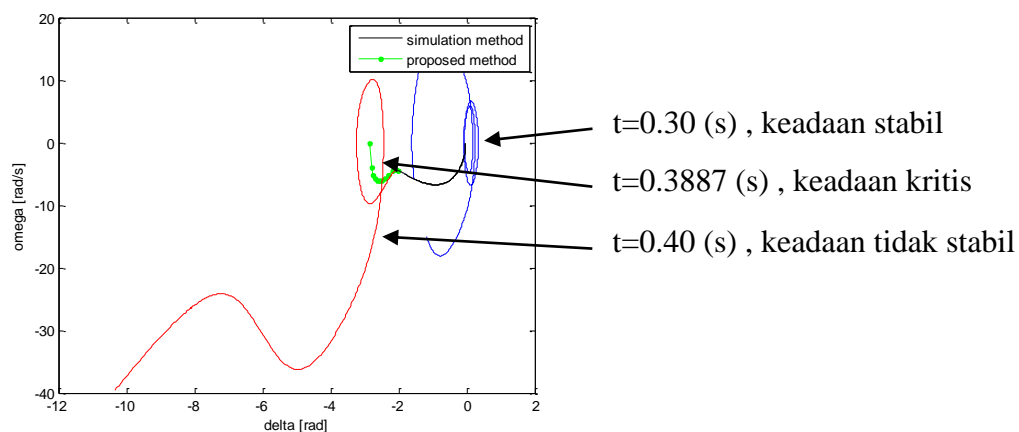
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Proposed Method			Simulation	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
A	8-28	0,3887	G3	0,2833	0,3-0,4	1,504
B	10-17	0,7795	G5	0,2323	0,77-0,80	3,289
C	12-15	0,7875	G6	0,4631	0,75-0,80	3,11
D	12-16	0,7934	G6	0,4571	0,75-0,80	3,024

Tabel 4.27 Nilai CCT pada Sistem IEEE 30 Bus yang Dimodifikasi dengan Mempertimbangkan *Damping*

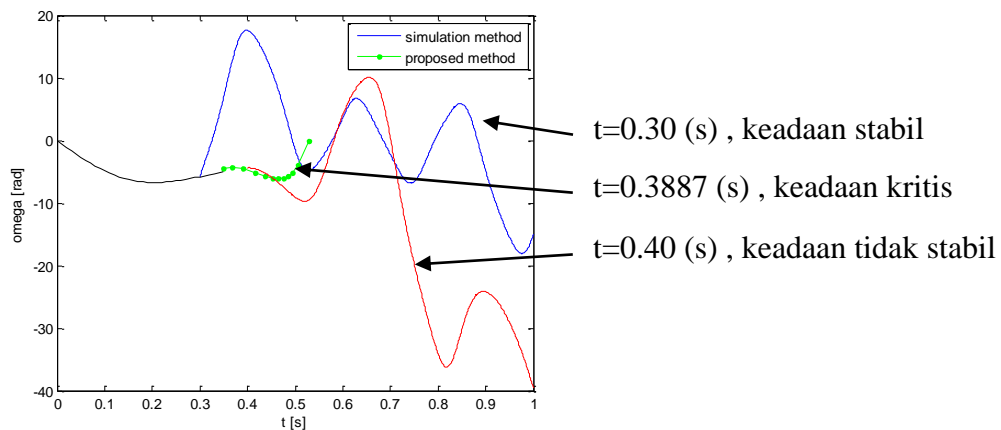
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Proposed Method			Simulation	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
B	10-17	1,3066	G5	0,2323	1,3-1,35	3,053
C	12-15	1,3372	G6	0,4398	1,33-1,34	3,064
D	12-16	1,4484	G6	0,2426	1,3-1,5	3,147

Tabel 4.28 Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 30 Bus Modifikasi tanpa *Infinite Bus*

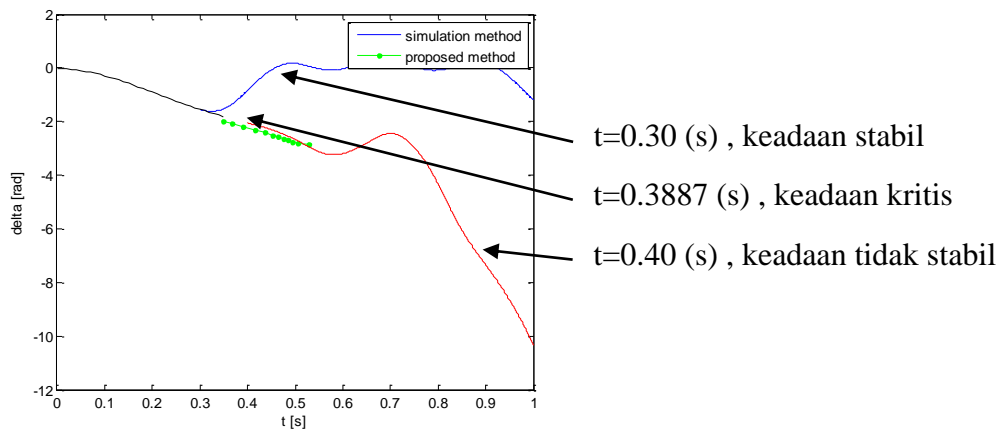
<i>ID Sumber</i>	V (pu)	P (pu)
<i>Grid</i>	1,0500 + 0,0000i	0,0125
G2	1,0447 - 0,0248i	0,0388
G3	1,0484 - 0,0220i	0,4948
G4	1,0467 - 0,0261i	0,5545
G5	1,0363 - 0,0267i	0,0801
G6	1,0452 - 0,0284i	0,3176



Gambar 4.26 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa *damping*



Gambar 4.27 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa *damping*



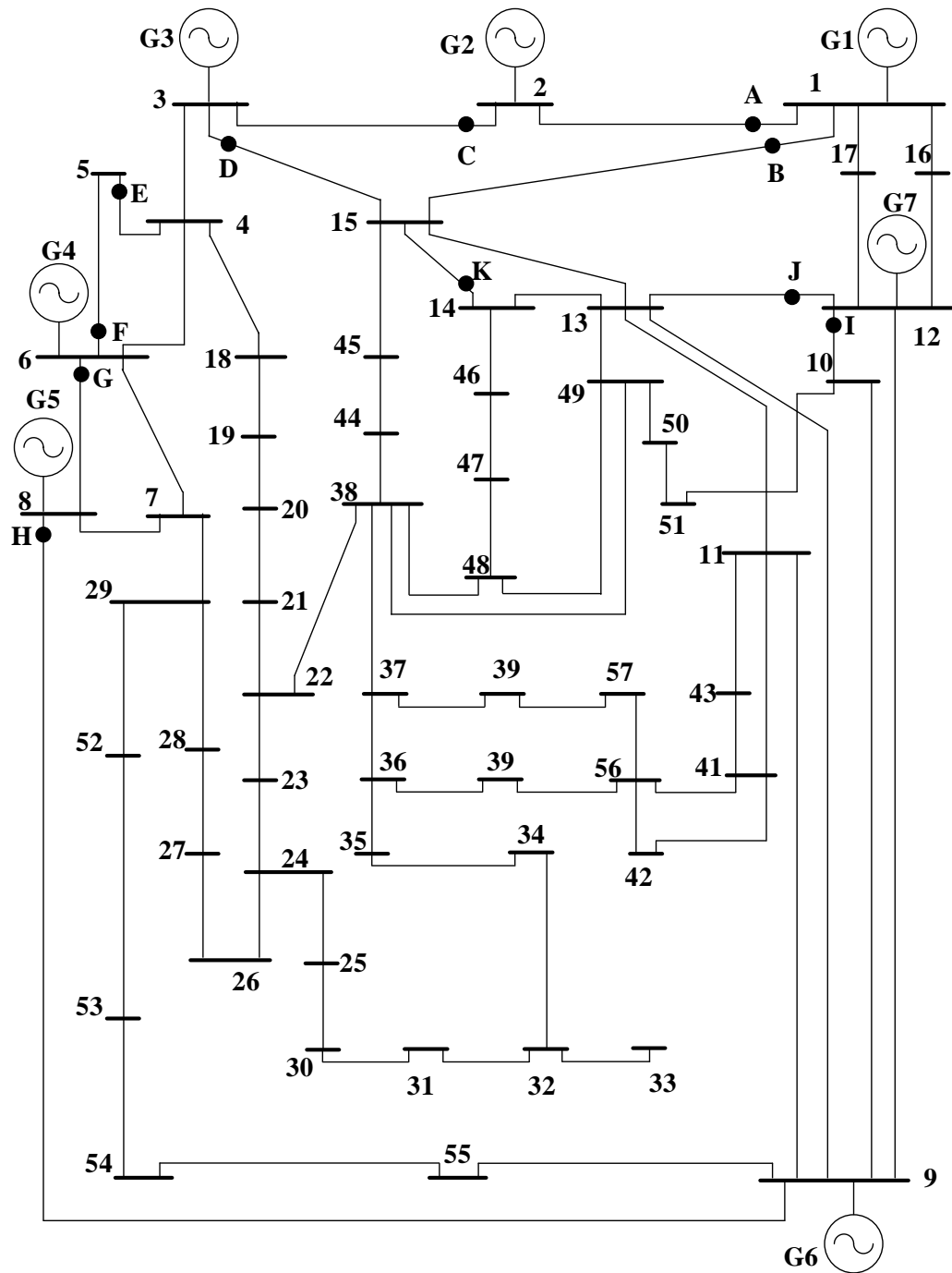
Gambar 4.28 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa *damping*.

4.2.3 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 57 Bus tanpa *Infinite Bus*

Gambar 4.29 adalah gambar Sistem IEEE 57 Bus yang tidak terhubung *infinite bus*. Nilai CUEP dari masing – masing generator dan generator kritis dapat dilihat pada Tabel 4.29. Sementara Tabel 4.30 dan 4.31 memperlihatkan perbandingan dua metode. Dari kedua tabel terlihat bahwa saat tidak menambahkan *damper winding* kedua metode menghasilkan nilai CCT yang sesuai. Namun saat penambahan *damping* terdapat *error* pada titik 'F', 'G', 'J' dan 'K' dengan rata – rata sebesar 15.2 %. Penambahan ini juga berakibat pada nilai CCT yang lebih tinggi. Kedua tabel juga memperlihatkan bahwa waktu yang dibutuhkan oleh

metode *critical trajectory* lebih cepat dibandingkan metode TDS. Sementara nilai tegangan dan daya generator dituliskan pada Tabel 4.32.

Gambar 4.30, 4.31 dan 4.32 memperlihatkan keadaan dari generator G5 saat terjadi gangguan di 'H'. Keadaan saat stabil dan tidak stabil diperoleh dari metode TDS. Sementara keadaan kritis diperoleh dari metode *critical trajectory*.



Gambar 4.29 Sistem IEEE 57 Bus tanpa *Infinite Bus*

Tabel 4.29 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 57 Bus

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Nilai CUEP							CG
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	
A	1 - 2	1,354	1,6191	1,6059	1,64	1,5605	1,6383	1,6072	G6
B	1 - 15	1,3572	1,5469	1,6218	1,6633	1,5885	1,6669	1,6385	G6
C	2 - 3	1,3613	1,5532	1,6337	1,6664	1,5895	1,6669	1,6407	G6
D	3 - 15	1,3606	1,5749	1,6238	1,6609	1,583	1,6608	1,6354	G4
E	4 - 5	1,3605	1,5755	1,6148	1,662	1,586	1,6643	1,64	G6
F	6 - 5	0,0721	0,0772	0,0871	0,1136	0,0362	0,1117	0,103	G4
G	6 - 8	0,0721	0,0773	0,0877	0,1162	0,0341	0,1104	0,1025	G4
H	8 - 9	0,023	0,4035	0,4186	0,3791	2,7952	0,512	0,4791	G5
I	12 - 10	1,3603	1,5749	1,6158	1,6612	1,5863	1,6655	1,6366	G6
J	12 - 13	1,3604	1,5759	1,6157	1,6601	1,5844	1,6633	1,6412	G6
K	14 - 15	1,3601	1,5734	1,6133	1,6606	1,5862	1,6655	1,6417	G6

Tabel 4.30 Nilai CCT pada Sistem IEEE 57 Bus Tanpa *Damping*

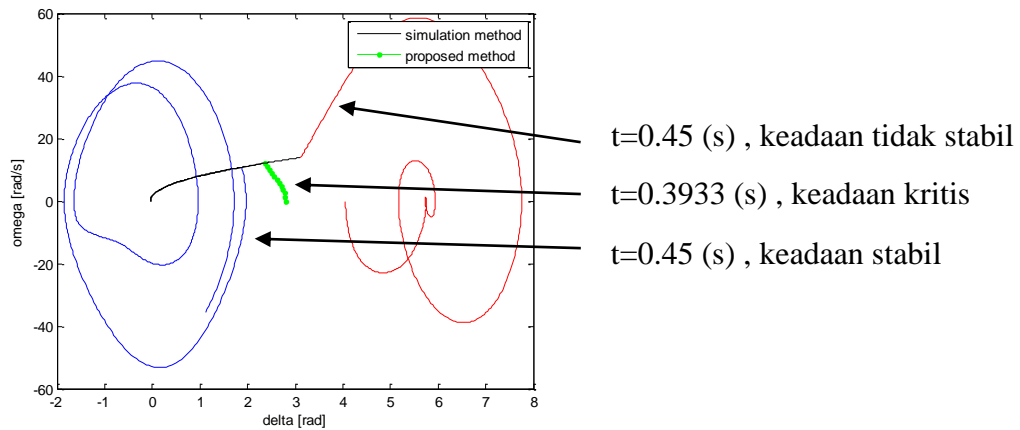
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
A	1 - 2	0,2078	G6	0,3451	0,18-0,22	1,537
B	1 - 15	0,21	G6	0,337	0,18-0,22	1,513
C	2 - 3	0,1964	G6	0,3567	0,15-0,2	1,544
D	3 - 15	0,1796	G4	0,4766	0,15-0,19	1,594
E	4 - 5	0,2986	G6	0,2985	0,25-0,32	1,559
F	6 – 5	0,3094	G4	0,5273	0,30-0,35	1,473
G	6 – 8	0,4148	G4	0,521	0,45-0,7	1,528
H	8 – 9	0,3933	G5	0,2318	0,35-0,45	1,583
I	12 - 10	0,3167	G6	0,525	0,20-0,35	1,539
J	12 - 13	0,3268	G6	0,5456	0,20-0,35	1,525
K	14 - 15	0,2854	G6	0,5636	0,25-0,30	3,749

Tabel 4.31 Nilai CCT pada Sistem IEEE 57 Bus dengan Mempertimbangkan *Damping*

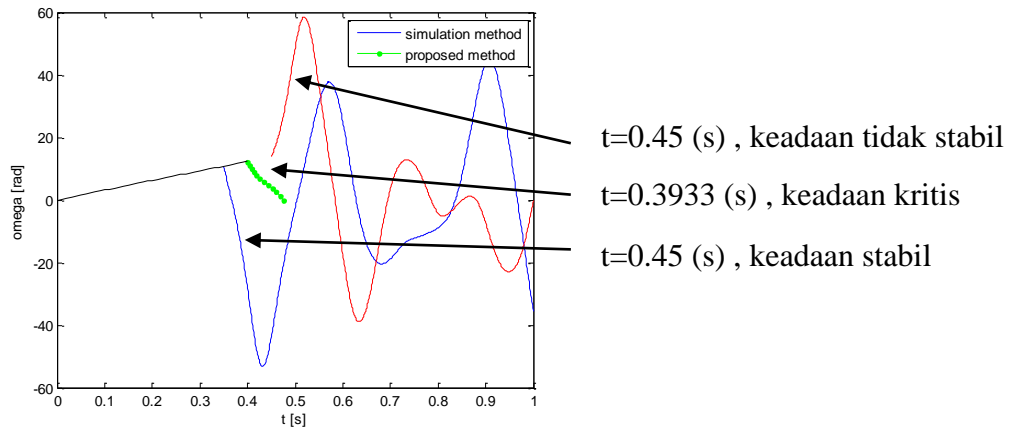
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode <i>Critical Trajectory</i>			Metode TDS	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
A	1 – 2	0,2073	G6	0,2791	0,18-0,22	1,604
B	1 - 15	0,2097	G6	0,2646	0,18-0,22	1,504
C	2 – 3	0,1962	G6	0,2481	0,15-0,2	1,536
D	3 - 15	0,1793	G4	0,2439	0,15-0,19	1,581
E	4 – 5	0,2981	G6	0,2443	0,25-0,32	1,593
F	6 – 5	0,561	G4	0,5191	0,3-0,5	3,223
G	6 – 8	0,2724	G4	0,524	0,3-0,4	1,504
H	8 – 9	0,3933	G5	0,2157	0,35-0,45	1,49
I	12 - 10	0,3167	G6	0,5656	0,20-0,35	1,472
J	12 - 13	0,4388	G6	0,5187	0,20-0,35	1,523
K	14 - 15	0,3541	G6	0,5253	0,25-0,30	1,468

Tabel 4.32 Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 57 Bus tanpa *Infinite Bus*

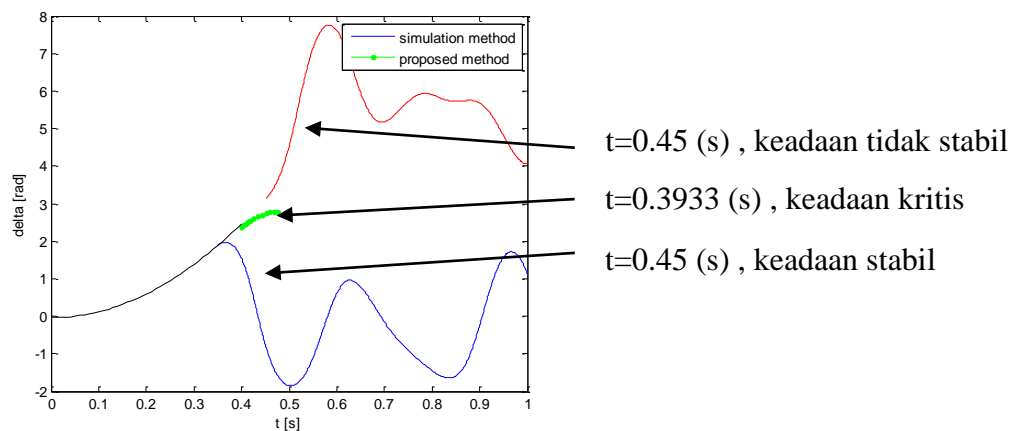
<i>ID Sumber</i>	V (pu)	P (pu)
<i>Grid</i>	1,0400 + 0,0000i	0,1485
G2	1,0433 - 0,0036i	0,077
G3	1,0522 - 0,0145i	0,039
G4	1,0543 - 0,0173i	0,005
G5	1,0560 - 0,0199i	0,02
G6	1,0562 - 0,0199i	0,089
G7	1,0550 - 0,0177i	0,053



Gambar 4.30 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa *damping*



Gambar 4.31 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa *damping*

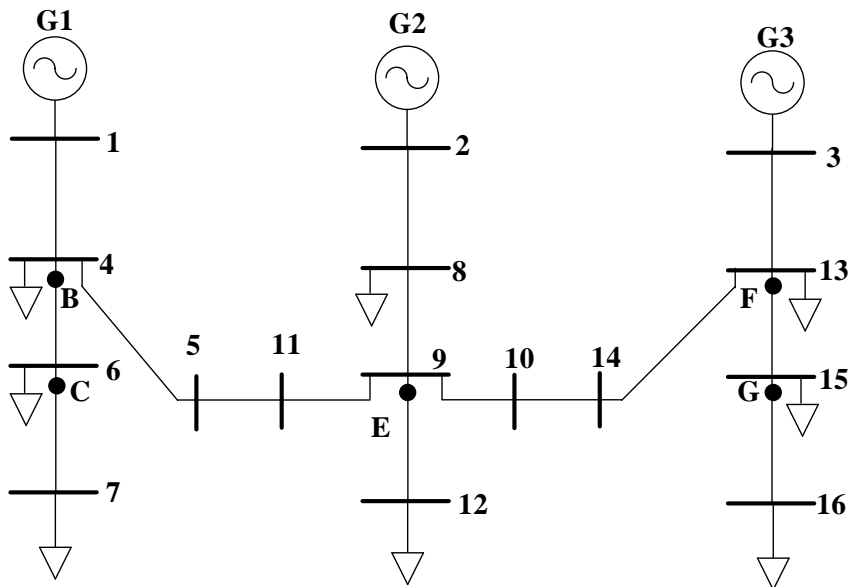


Gambar 4.32 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa *damping*.

4.2.4 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 16 Bus tanpa *Infinite Bus*

Sebelum perhitungan CCT dilakukan, nilai CUEP harus cari terlebih dahulu. Nilai CUEP dan generator kritis pada sistem ini dapat dilihat pada Tabel 4.33. Perhitungan CCT pada sistem IEEE 16 bus menggunakan metode *critical trajectory* dan metode TDS ada pada Tabel 4.34 dan 4.35. Dari kedua tabel tersebut terlihat bahwa dari titik gangguan yang dihitung, hasil metode *critical trajectory* sama dengan metode TDS. Waktu yang dibutuhkan untuk perhitungan dengan metode *critical trajectory* juga lebih singkat dibandingkan dengan metode TDS. Tabel 4.34 adalah perhitungan tanpa mempertimbangkan *dampers winding*, sedangkan Tabel 4.35 memperhatikan *dampers winding* dengan koefisien sebesar 1 %. Penambahan ini akan menaikkan nilai CCT.

Gambar 4.34, 4.35 dan 4.36 menggambarkan kondisi generator saat sistem terkena gangguan. Setiap gambar memperlihatkan keadaan saat generator stabil, kritis, dan tidak stabil. Gambar juga memperlihatkan perbandingan antara metode *critical trajectory* dan metode TDS.



Gambar 4.33 Sistem IEEE 16 Bus tanpa *Infinite Bus*

Tabel 4.33 Nilai CUEP pada Sistem IEEE 16 Bus

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Nilai CUEP			CG
		G1	G2	G3	
B	4-6	0,5077	2,0398	0,3558	G2
C	6-7	0,5065	2,0349	0,3548	G2
E	9-12	0,5048	2,0288	0,3553	G2
F	13-15	0,1781	0,3326	2,1028	G3
G	15-16	0,1779	0,3324	2,1007	G3

Tabel 4.34 Nilai CCT pada Sistem IEEE 16 Bus Tanpa *Damping*

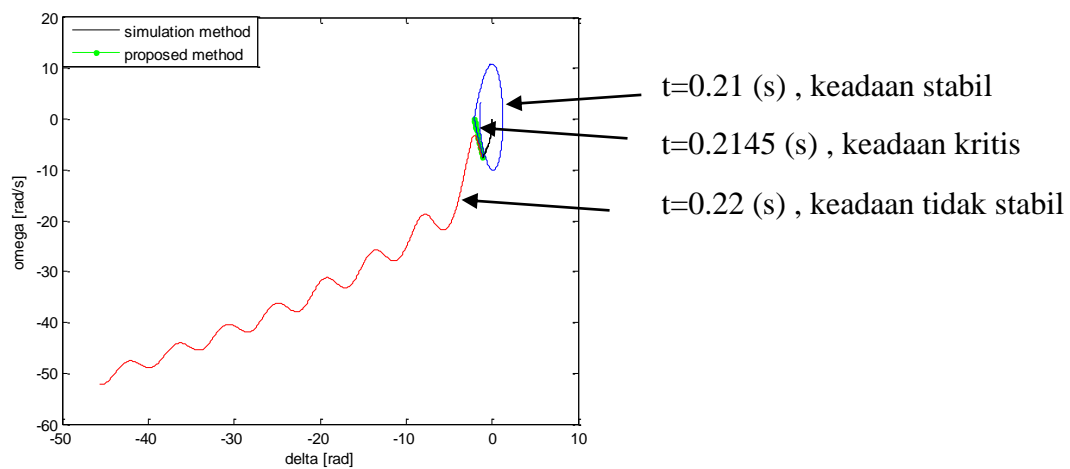
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Proposed Method			Simulation	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
B	4-6	0,2145	G2	0,1618	0,21-0,22	4,714
C	6-7	0,5515	G2	0,1257	0,50-0,60	2,966
E	9-12	0,5525	G2	0,2122	0,5-0,6	4,597
F	13-15	0,1758	G3	0,1372	0,17-0,18	3,103
G	15-16	0,2758	G3	0,177	0,25-0,28	3,074

Tabel 4.35 Nilai CCT pada Sistem IEEE 16 Bus dengan Mempertimbangkan *Damping*

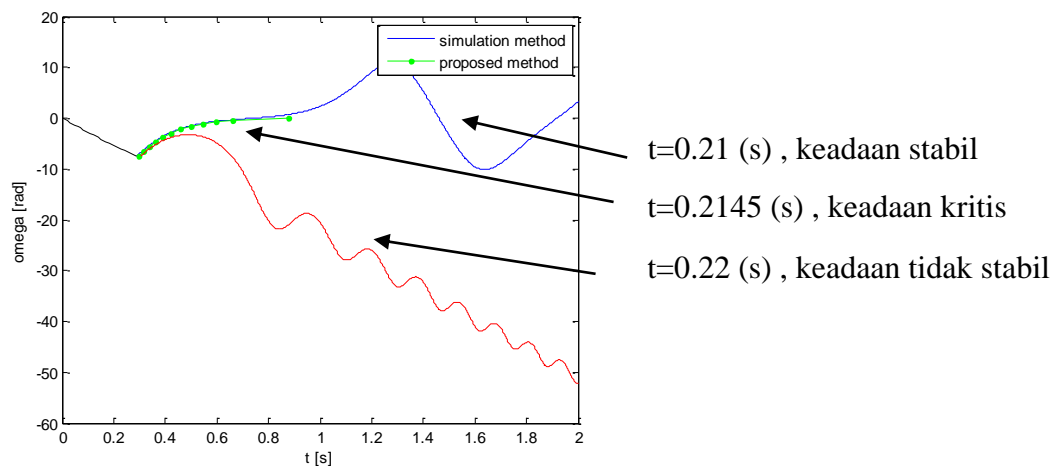
Fault Point	Open Line	Proposed Method			Simulation	
		CCT (s)	CG	CPU(s)	CCT (s)	CPU (S)
B	4-6	0,2223	G2	0,1746	0,22-0,23	4,614
C	6-7	0,566	G2	0,2612	0,55-0,60	2,957
E	9-12	0,574	G2	0,2751	0,55-0,6	4,984
F	13-15	0,1855	G3	0,1282	0,18-0,19	3,024
G	15-16	0,2976	G3	0,1318	0,29-0,3	3,197

Tabel 4.36 Nilai Tegangan dan Daya pada Sistem IEEE 30 Bus Modifikasi tanpa *Infinite Bus*

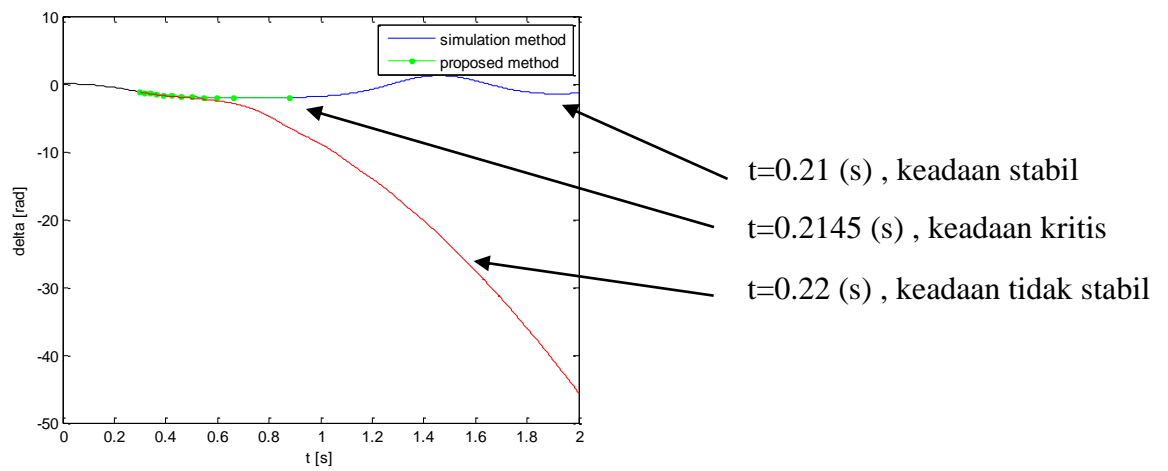
ID Sumber	V (pu)	P (pu)
G1	1,0000 + 0,0000i	0,001
G2	1,0251 + 0,0899i	0,2
G3	1,0173 + 0,0470i	0,1



Gambar 4.34 Kurva sudut daya (θ) dan kecepatan putar rotor (ω) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa *damping*



Gambar 4.35 Kurva kecepatan putar rotor (ω) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'A' tanpa *damping*



Gambar 4.36 Kurva sudut daya (θ) terhadap waktu (t) mulai dari keadaan stabil sampai tidak stabil pada titik gangguan 'B' tanpa *damping*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan di peroleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode *Critical Trajectory* dapat digunakan untuk menentukan nilai CCT saat terjadi gangguan pada sistem *single circuit* baik untuk konfigurasi *loop* ataupun radial. Metode juga dapat digunakan saat sistem didukung oleh *grid* maupun saat sistem dikondisikan sebagai *smart grid*.
2. Metode yang digunakan juga dapat menentukan nilai CCT langsung secara tepat dengan perbandingan metode TDS. Metode *Critical Trajectory* juga membutuhkan waktu perhitungan yang lebih cepat.
3. Penentuan generator kritis menggunakan metode *BCU Shadowing* menyebabkan waktu perhitungan CCT lebih cepat.
4. Persamaan simultan juga dapat tercapai menggunakan *end point* dari *BCU Shadowing*
5. Metode *Critical Trajectory* efektif untuk penentuan nilai CCT dengan rata – rata *error* sebesar 1.496 % dari total pengujian yag telah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Saadat, Power System Analysis, New York: Mc Graw-Hill, Inc, 1999, Ch.1 & 6,
- [2] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “Definition and Classification of Power System Stability,” IEEE Transaction on Power System, Vol. 19, No. 2, pp. 1388-1396, May 2004.
- [3] T. Athay, R. Podmore, and S. Virmani, “A Practical Method for The Direct Analysis of Transient Stability,” IEEE Transaction On Power Apparatus and System, Vol.PAS-98, No 2, pp. 573-579, March/April 1979.
- [4] G.D. Irisarri, G.C. Ejebe, J.G. Waight and W.F. Tinney, “Efficient Solution for Equilibrium Points in Transient Energy Function Analysis,” IEEE Transaction on Power System, Vol. 9, No. 2, pp. 693-696, May 1994
- [5] H.D. Chiang, F.F. Wu and P.P. Varaiya, “Method for Direct Analysis of Power System Transient Stability,” IEEE Transaction on Power System, Vol. 9, No. 3, pp 1194-1197, August 1994.
- [6] R.T. Treinen, V. Vittal, and W. Kliemann, “An Improved Technique to Determine the Controlling Unstable Equilibrium Point in a Power System,” IEEE Transaction on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 43, No. 4, pp 321-322, April 1996.
- [7] Y. Zou, M.H. Yin, and H.D. Chiang, “Theoretical Foundation of the Controlling UEP Method for Direct Transient Stability Analysis of Network – Preserving Power System Models,” IEEE Transaction On Circuit and System-I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 50, No. 10, pp. 1324-1335, October 2003.
- [8] N. Yorino, A. Priyadi, R.A. Mutalib, Y. Sasaki, Y. Zoka and H. Sugihara, “A Novel Method for Direct Computation CCT for TSA Using Critical Generator Conditions,” TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference, pp. 533-538, 2010.

- [9] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui, and M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability," *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 25, No. 3, pp. 1620-1626, August 2010.
- [10] A. Priyadi, N. Yorino, O.A. Qudsi and M. H. Purnomo, "CCT Computation Method Based on Critical Trajectory Using Simultaneous Equation for Transient Stability Analysis," 6th International Conference on Information and Electrical Engineering (ICITEE), 2014.
- [11] I.B. Sulistiawati, A. Priyadi, O.A. Qudsi, A. Soeprijanto and N. Yorino, "Critical Clearing Time Prediction within Various Loads for Transient Stability Assessment bu Means of the Extreme Learning Machine," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol 77, pp 345-352, May 2016.
- [12] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, Inc, 1994, Ch. 3, pp. 128-136.
- [13] J.J. Grainger and W.D. Stevenson, Jr. *Power System Analysis*, New York: Mc Graw-Hill, Inc, 1994, Ch. 16, pp. 695-746.
- [14] P.M. Anderson and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*, United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2003, Ch. 2, pp. 13-52.
- [15] Stephens. Jennie C., Elizabeth J Wilson dan Tarla R. Peterson, *Smart Grid Revolution*, New York : Cambridge University Press, 2015, pp 1-2
- [16] Zhu, Jizhong, *Optimization of Power System Operation 2nd Edition*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2015, pp.6-7
- [17] X. Fang, S. Misra, G. Xue and D. Yang, "Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol 14, pp 1-31, September 2011.
- [18] H. E. Baitie and T. Selmi, "Review of Smart Grid Systems' Requirements," *Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, pp 1-6, 2015.
- [19] J. Liu, Y. Xiao and J. Gao, "Achieving Accountability in Smart Grid," *IEEE Systems Journal*, Vol. 8, No. 2, pp 493 – 507, June 2014.

- [20] T. Strasser, F. Andrén, J. Kathan, C. Cecati, C. Buccella, P. Siano, P. Leitão, G. Zhabelova, V. Vyatkin, P. Vrba and V. Marík, “A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems,” IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 62, No. 4, pp 2424 – 2434, April 2015.
- [21] S. J. Chapman, Electrical Machinery Fundamental 4th Edition, New York: Mc Graw-Hill, Inc, 2005, Ch 5 - 6.
- [22] U. Thongkrajay, N. Poolsawat, T. Ratniyomchai and T. Kulworawanichpong, “Alternative Newton-Raphson Power Flow Calculation in Unbalanced Three-Phase Power Distribution Systems,” 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, pp. 24-29, March 2006.
- [23] T. Kulworawanichpong, “Simplified Newton-Raphson Power-Flow Solution Method,” International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol 32, pp. 551-558, November 2009.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR INDEX

BCU	= <i>Boundary of stability region-based Controlling Unstable equilibrium point</i>
CCT	= <i>Critical Clearing Time</i>
cg	= <i>critical generator</i>
CUEP	= <i>Controlling Unstable Equilibrium Point</i>
SEP	= <i>Stable Equilibrium Point</i>
TDS	= <i>Time Domain Simulation</i>
UEP	= <i>Unstable Equilibrium Point</i>
A	= turunan fungsi $G(X)$ terhadap ω
$A(X_S)$	= daerah kestabilan
$\partial A(X_S)$	= batas kestabilan
$\partial A(V(x_{co}))$	= lintasan energi
b	= <i>error</i>
c	= konstanta
$\Delta c^{(0)}$	= selisih nilai konstanta dengan nilai awal fungsi
E	= tegangan dalam generator
E_G	= tegangan dalam generator
E_M	= tegangan dalam motor
E_i^0	= tegangan dalam awal generator i
E_i^k	= tegangan dalam generator i terhadap perpindahan waktu
f	= fungsi lintasan
$f(x^{(0)})$	= fungsi dari nilai awal dari x
$f_F(x)$	= fungsi lintasan sebelum gangguan
$G(X)$	= minimisasi persamaan simultan
G^k	= fungsi $G(X)$ terhadap perpindahan waktu
g_i	= fungsi $G(X)$ generator i
$g_{\omega i}^k$	= fungsi kecepatan sudut generator i terhadap perpindahan waktu
$g_{\theta i}^k$	= fungsi sudut rotor generator i terhadap perpindahan waktu
g_{Pmi}^k	= fungsi daya mekanik generator i terhadap perpindahan waktu

g_{Ei}^k	= fungsi tegangan dalam generator i terhadap perpindahan waktu
J_0	= matiks Jacobian awal
J	= matiks Jacobian setelah penambahan pembobot
k	= perpindahan terhadap waktu
N	= bilangan nyata
P	= daya aktif
P_i	= daya aktif pada bus i
P_{mi}^0	= daya awal generator i
P_{mi}^k	= daya generator i terhadap perpindahan waktu
Q_i	= daya reaktif pada bus i
R	= bilangan nyata
R^N	= bilangan nyata kelipatan N
t	= waktu
V_i	= tegangan pada bus i
V_j	= tegangan pada bus j
$W^S(X_{co})$	= lintasan energi kritis
X_L	= reaktansi induktif saluran
X_G	= reaktansi induktif generator
X_M	= reaktansi induktif motor
X_T	= reaktansi induktif total
X_e	= <i>exit point</i>
X_1	= titik UEP
X_2	= titik UEP
X_{co}	= titik CUEP
X_{cl}	= titik UEP
X_S	= titik kestabilan setelah gangguan
X_{cr}	= titik kritis
X_S^{pre}	= titik kestabilan awal
x^0	= titik x awal
x^k	= titik x terhadap perpindahan waktu
x^{k+1}	= titik x terhadap perpindahan waktu selanjutnya

x^1	= titik x pertama
x^2	= titik x kedua
x^3	= titik x ketiga
x^m	= titik x ke- m (m = titik terakhir sebelum titik kritis)
X_F	= titik saat gangguan terjadi
x_{pre}	= titik sebelum gangguan terjadi
$X(t; x^0)$	= fungsi lintasan setelah gangguan dari t sampai titik awal
$x^{(0)}$	= nilai awal dari x
$\Delta x^{(0)}$	= nilai <i>error</i> yang diperbolehkan
$x^{(1)}$	= nilai x pada iterasi pertama
Y_{bus}	= matriks impedansi saluran
Y_{ii}	= jumlah admitansi yang terhubung pada bus i
y_{ij}	= admitansi saluran antara bus i dan j
Y_{ij}	= negatif dari admitansi saluran antara bus i dan j
Y_n	= admitansi bus ke n
δ	= penyimpangan sudut generator
θ_i^k	= sudut rotor generator i terhadap perpindahan waktu
ω	= kecepatan rotor (rad/detik)
ω^k	= kecepatan rotor terhadap fungsi waktu (rad/detik)
ω^{k+1}	= kecepatan rotor terhadap fungsi waktu selanjutnya (rad/detik)
$\tilde{\omega}_i^k$	= kecepatan rotor generator i (rad/detik)
τ	= waktu CCT
x^u	= titik kritis
ε	= jarak antara titik pada persamaan <i>Trapezoidal</i>
$\Delta \varepsilon$	= batasan <i>error</i>

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Firilia Filiana. Penulis lahir pada tanggal 2 April 1994 di Lamongan. Penulis mulai menempuh pendidikan formal di TK Merak Samboja. Selanjutnya penulis menempuh pendidikan di Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur sampai lulus dari sekolah menengah atas tahun 2010. Penulis melanjutkan pendidikan di D3 Teknik Elektro dengan bidang studi Elektro Industri. Penulis mendapatkan gelar sarjana dari Teknik Elektro ITS pada tahun 2015 dengan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

Saat ini penulis menyelesaikan pendidikan pascasarjana di Departemen Teknik Elektro, bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga. Penulis mengambil konsentrasi penelitian pada kestabilan *transient* sistem tenaga dan dapat dihubungi melalui email firilia.24@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan